

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**UNIVERZÁLNÍ REGULÁTOR DOBÍJENÍ PRO MOTOROVÁ
VOZIDLA S DYNAMEM**

UNIVERSAL CONTROLLER FOR CAR OR MOTORCYCLE DYNAMO

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Picmaus

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Jan Picmaus

ID: 186556

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Univerzální regulátor dobíjení pro motorová vozidla s dynamem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Dokončete návrh regulátoru řešeného v rámci SP.
2. Zařízení realizujte a instalujte do vozidla.
3. Provedte veškeré provozní zkoušky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PATOCKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [2] Vorel P., Patocka M., Průmyslová elektronika, Vydání 1., skriptum FEKT VUT Brno, 2007
- [3] SKALICKÝ, J. Navrhování elektrických pohonů. Navrhování elektrických pohonů. Brno: VUT FEKT, 2002.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou návrhu elektronického regulátoru dobíjení pro historická vozidla s dynamem. Obsahuje teoretický rozbor samotného stroje (dynama) a jeho zapojení s cizím a derivačním buzením. Dále se zabývá problematikou možných zapojení dynam v různých vozidlech. Práce srovnává průmyslově vyráběné regulátory s amatérsky realizovanými regulátory, přičemž porovnává jejich výhody a nevýhody. Z analýzy průmyslových a amatérských regulátorů vyvozuje všechny požadavky na realizovaný regulátor. Práce obsahuje proces návrhu zapojení regulátoru včetně fungující finální verze. Dále popisuje návrh a realizaci DPS s následným popisem realizace regulátoru a instalace do vozidla. V práci je zahrnut také návrh samotných regulátorů proudu a napětí, jejich následné odladění a provozní zkoušky na reálném zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Regulátor, PWM, Relé, Operační zesilovač, Komparátor, Dynamo, Buzení, Generátor trojúhelníkového signálu, Tranzistor, Diferenciální zesilovač, Bočník, Kondenzátor, Dioda, DPS, Varistor, Trimr, Akumulátor, Rotor, Stator, Vinutí

ABSTRACT

The thesis deals with the issue of design of an electronic controller of charging for historical cars using a dynamo. It contains theoretical analysis of the machine itself (dynamo) and analysis of a shunt wound dynamo and a separately excited dynamo. It is also focused on possible usage of a dynamo in various vehicles. The work compares industrially produced controllers with amateur manufacture as well as confronts their positives and negatives. All requests for the implemented controller are deduced from the analysis of the industrial and amateur controllers. The thesis consists of process plan of controller connection including the final working version and also the project and realization of a PCB as well as following description of putting the controller into practice and installation in the car. The thesis includes the project of current and voltage controllers, following adjustment and operation tests with use of the real device.

KEYWORDS

Regulator, PWM, Relay, Operational amplifier, Comparator, Dynamo, Excitation, Triangle wave generator, Transistor, Differential amplifier, Shunt, Condenser, Diode, PCB, Varistor, Trimr, Accumulator, Rotor, Stator, Windings

PICMAUS, Jan. *Univerzální regulátor dobíjení pro motorová vozidla s dynamem*. Brno, 2019, 59 s. Bakalářská práce. Brno University of Technology, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Univerzální regulátor dobíjení pro motorová vozidla s dynamem“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Daliboru Červinkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

1	Dynamo	11
1.1	Konstrukce	11
1.2	Princip činnosti	12
1.3	Regulace výstupního napětí	13
1.4	Dynamo s cizím buzením	13
1.5	Derivační dynamo	14
2	Zapojení dynam v různých vozidlech	16
2.1	Buzení pevně spojeno s živým pólem	16
2.2	Buzení pevně spojeno s kostrou vozidla	16
2.3	Zapojení pólů ke kostře	17
2.3.1	Záporný pól spojený s kostrou	17
2.3.2	Kladný pól spojený s kostrou	17
3	Možnosti prvotního nabuzení dynamu	18
3.1	Nabuzení vnějším zdrojem	18
3.2	Nabuzení remanentním magnetismem	18
4	Průmyslově vyráběné regulátory	18
4.1	Regulační relé	18
4.1.1	Jednokotvové regulační relé	19
4.1.2	Dvoukotvové regulační relé	20
4.2	Elektronický regulátor	21
4.2.1	Komerčně dostupné elektronické regulátory	21
4.2.2	Řešení nedostatků komerčních regulátorů	23
5	Amatérsky realizované regulátory	24
5.1	Dvoustavová regulace	24
5.2	Spojité regulace	25
5.3	Regulace s PWM	26
6	Možnosti měření proudu	27
6.1	Bočník	27
6.2	Čidlo s Hallovou sondou	27
7	Požadavky na nově realizovaný regulátor	28
7.1	Nabuzení dynamu bez akumulátoru	29
7.2	Použití polovodičů	29

7.3	Bezztrátová regulace	29
7.4	Variabilita zapojení buzení a pólu na kostře	29
7.5	Rychlost a přesnost regulace	29
7.6	Ochrana proti přepětí	30
7.7	Ochrana proti proudovému přetížení	30
7.8	Elektromagnetická kompatibilita	30
7.9	Konstantní napětí	31
7.10	Maximální proud do buzení	31
7.11	Rozměry regulátoru	31
8	Návrh zapojení regulátoru	31
8.1	Blokové schéma	31
8.2	Návrh zapojení regulátoru	32
8.2.1	Filtrační kondenzátory integrovaných obvodů	33
8.2.2	Bočník	34
8.2.3	Diferenciální zesilovač	34
8.2.4	OZ LM358 místo TL082	34
8.2.5	Zvýšení frekvence	34
8.2.6	Filtrační kondenzátor výstupního napětí	35
8.2.7	Nulové diody	35
8.2.8	Jeden MOS-FET	35
8.2.9	Ochranné varistory	35
9	Návrh regulátorů	36
9.1	Návrh proudového regulátoru	36
9.1.1	Návrh proudového regulátoru 150W dynama	36
9.1.2	Návrh proudového regulátoru 200W dynama	38
9.1.3	Návrh proudového regulátoru 250W dynama	39
9.2	Návrh napěťového regulátoru	40
10	Princip funkce zapojení	40
10.0.1	Analýza při zastaveném dynamu	41
10.0.2	Rozbíhající se dynamo do výstupního napětí 6 V	41
10.0.3	Rozbíhající se dynamo do výstupního napětí 8 V	41
10.0.4	Analýza regulátoru při zvyšování napětí mezi 8 V a 14,5 V	41
10.0.5	Analýza nominálního chodu	42
10.0.6	Analýza při zvyšujícím se proudu bočníkem	42

11 Ladění parametrů zapojení	43
11.1 Nastavení zesílení napěťového čidla	43
11.2 Nastavení zesílení čidla proudu	43
11.3 Nastavení zesílení a časových konstant regulátorů	43
11.4 Nastavení velikosti odporu bočníku	44
11.5 Nastavení maximálního proudu procházejícího tranzistorem kompa- rátoru	44
12 Návrh DPS	44
13 Instalace do vozidla	45
14 Provozní zkoušky	46
14.0.1 Testování při volnoběžných otáčkách traktoru	47
14.0.2 Testování při jízdě po silnici	47
14.0.3 Testování jízdou v terénu	48
14.0.4 Testování při pohonu přípojného zařízení	48
15 Závěr	49
Literatura	50
Seznam symbolů, veličin a zkratk	51
A Schémata	54
A.1 Předběžné schéma	54
A.2 Výsledné zapojení	55
A.3 Seznam součástí	56
B Desky plošných spojů	58
B.1 Návrh desky plošných spojů	58
B.2 Osazovací deska	59
Seznam příloh	53

Seznam obrázků

1.1	Stator stejnosměrného stroje	11
1.2	Rotor stejnosměrného stroje	12
1.3	Princip dynama [3]	13
1.4	Dynamo s cizím buzením: a) schéma, b) vnější charakteristika [2] . .	14
1.5	Derivační dynamo: a) schéma, b) vnější charakteristika [2]	15
4.1	Jednokotvové regulační relé schéma [4]	19
4.2	Schéma dvoukotvového regulačního relé [4]	20
4.3	Elektronický regulátor RM7V-N [5]	22
4.4	Elektronický regulátor AEV [6]	22
4.5	Regulátor RM s přídatným relé	23
5.1	Schéma dvoustavové regulace	24
5.2	Schéma spojitě regulace [7]	25
5.3	Schéma zapojení pulsní regulace [8]	26
6.1	Princip Hallovy sondy	27
8.1	Blokové schéma	32
8.2	Zapojení na kontaktním poli	33
9.1	Zapojení PI regulátoru s OZ	36
9.2	Regulační smyčka pro všechna dynama	36
13.1	Zařízení instalované do vozidla (zakryté)	45
13.2	Zařízení instalované do vozidla (odkryté)	46
14.1	Traktor pro testování regulátoru	47

Úvod

Účelem práce je vytvoření elektronického regulátoru dobíjení pro motorová vozidla (primárně automobily) s dynamem.

Regulace výstupního napětí a proudu dynama je oproti regulaci alternátoru dosti obtížná. Dynamo v zapojení, které je běžné ve většině vozidel, má tvrdou momentovou charakteristiku, oproti alternátoru, který ji má velice měkkou.

Při návrhu nového regulátoru je nutné uvažovat mnoho faktorů. Když se navrhuje nový regulátor dobíjení tak, aby měl smysl, je nutné, aby odstraňoval všechny nedostatky již realizovaných regulátorů ať již amatérských tak i průmyslových.

Pro samotný návrh regulátoru je nutné znát také teorii samotného stroje, proto tato práce nerozebírá pouze návrh regulátoru, ale zabývá se také samotným dynamem. Dále je nutné znát již navržené regulátory, aby nebyl opět navrhován již navržený regulátor.

Existuje mnoho různých druhů zapojení dynam ve vozidlech, proto, pokud je požadavkem vytvoření univerzálního regulátoru, tak je nutné navrhovat konstrukci pro všechna zapojení zároveň.

Samotný návrh zapojení obsahuje popis principu funkce a návrh DPS.

Instalace do vozidla a provozní zkoušky provozované na reálném stroji, jsou dalším ukazatelem, jestli byl návrh regulátoru úspěšný.

Toto téma bylo zvoleno z důvodu nutnosti nahrazení nespolehlivých regulačních relé dynam. Zároveň z nutnosti použití regulátoru v soukromém životě pro nově zakoupený traktor.

1 Dynamo

Dynamo je elektrický točivý stroj, který provádí konverzi mechanické energie na energii elektrickou. [2]

Tyto stroje patří mezi historicky nejstarší a oproti strojům střídavým jsou velmi náročné na údržbu. A to zejména z důvodu třecích kontaktů.

Dynama s vinutým statorem je možné rozdělovat podle zapojení buzení na:

- Derivační dynamo,
- Dynamo se sériovým buzením,
- Dynamo s cizím buzením,
- Kompaudní dynamo, [2]

1.1 Konstrukce



Obr. 1.1: Stator stejnosměrného stroje

Dynamo se může skládat ze dvou základních částí a to ze statoru (můžeme vidět na Obr. 1.1) a rotoru (můžeme vidět na Obr. 1.2). Rotor se skládá z komutátoru a vinutí. Stator se skládá z budícího vinutí nebo permanentních magnetů a je možné říci, že sem patří i kartáče stroje.

Komutátor je rotující část dynama složená z měděných lamel elektricky oddělených izolací. Hřídel rotoru je spojena přes izolační materiál s lamelami komutátoru, který je spojen s vinutím rotoru a přenáší elektrickou energii přes kartáče do sítě.[1], Komutátor funguje zároveň jako mechanický usměrňovač.



Obr. 1.2: Rotor stejnosměrného stroje

Vinutí jak rotoru tak statoru jsou cívky, které jsou rozmístěny po celém obvodu rotoru i statoru (pokud nejde o stroj s permanentními magnety). Zpravidla je na rotoru více cívek než na statoru. Budící vinutí je nutné nabudit proudem, aby dynamo vytvořilo na kartáčích napětí. Čím vyšší přivedeme proud do buzení tím vznikne větší síla, kterou je nutné překonat.

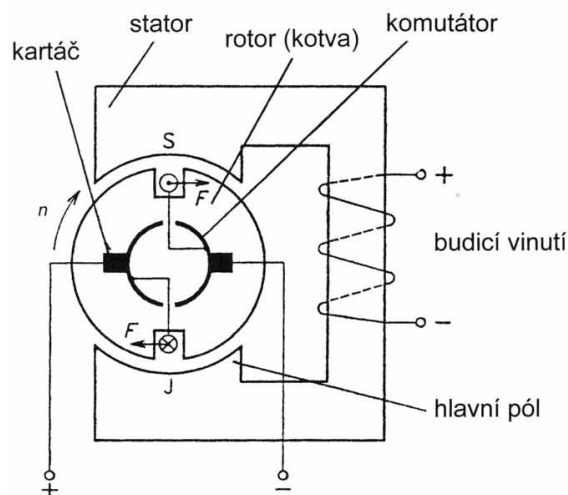
1.2 Princip činnosti

V homogenním magnetickém poli mezi dvěma póly se otáčí závit, jehož začátek a konec jsou připojeny na dvě lamely komutátoru, které se spolu s ním otáčejí. Magnetický tok indukuje v cívkách rotoru střídavé napětí, které je usměrňováno komutátorem. [2]

Po lamelách komutátoru kloužou dva uhlíkové kartáče, které jsou pevné a neotáčejí se s rotorem. Střídavě se dotýkají jedné a druhé lamely tak dlouho, dokud je například kladná a druhý se podobně dotýká stejně dlouho záporné lamely. [2]

Komutace se nazývá časová změna proudu v té cívce, která je právě v neutrální poloze a kartáče ho na krátký čas spojují nakrátko. [2] Usměrněné napětí jednoho závitu značně pulsuje. To je možné omezit a dosáhnout hladšího průběhu napětí přidáním více stejných cívek po celém obvodu rotoru. Komutátor má potom tolik lamel, jako je cívek na rotoru.

Na Obr. 1.3 je možno vidět výše popsanou funkci dynama a jeho součásti. Jako závit na rotoru dynama jsou zde vyobrazeny vodiče v řezu.



Obr. 1.3: Princip dynama [3]

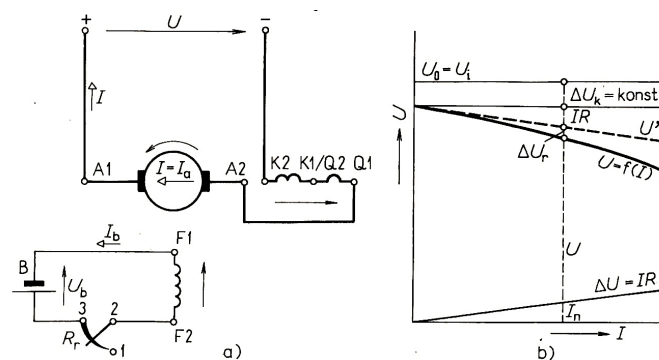
1.3 Regulace výstupního napětí

Z hlediska regulace je stejnosměrný stroj velmi výhodný. Závislost otáček na výstupním napětí je lineární (při konstantním buzení nebo s permanentními magnety). To znamená, že pokud je požadavkem dosažení určitého napětí, stačí roztočit motor na určité otáčky (pokud jde o dynamo s permanentními magnety), případně u vinutého statoru nabudit na určitou hodnotu. Když se bude zvyšovat proud do buzení u dynama s vinutým statorem, dojde ke zvýšení síly potřebné k otočení dynamem.

Dynamo s vinutým statorem je možné regulovat nejen změnou otáček, ale také změnou budícího proudu. Pokud jde o udržení konstantního výstupního napětí u takového dynama je nutné upravovat budící proud v okamžiku změny otáček. To znamená, že při poklesu otáček je nutné dynamo přibudit (zvýšit budící proud) a naopak při zvyšování otáček dynamo odbudit (snížit budící proud). Jelikož se tyto dynama často používají společně se spalovacími motory, u nichž je předpoklad, že se otáčky budou měnit ve velmi širokém pásmu, je tedy nutné vytvořit regulátor. Tento regulátor musí upravovat velikost budícího proudu v každém okamžiku, kdy se mění otáčky.

1.4 Dynamo s cizím buzením

Toto dynamo má budící vinutí napájené z vnějšího zdroje (např. baterie B na Obr. 1.4). Původně dynama byla vyráběna pouze jako dynama s cizím buzením. Výstupní napětí dynama lze měnit změnou budícího proudu, odporem v budícím obvodu (např. R_r na Obr 1.4) nebo změnou změnou budícího napětí U_b .



Obr. 1.4: Dynamo s cizím buzením: a) schéma, b) vnější charakteristika [2]

Vnější charakteristika je dána rovnicí:

$$U = U_i + \Delta U_k + I * R - \Delta U_r \quad (1.1)$$

V této rovnici znamenají symboly:

- U_i – Indukované napětí, které odpovídá nastavenému budicímu proudu
- ΔU_k – Úbytek napětí způsobený odporem kartáčů
- R – Odpor kotvy
- ΔU_r – Úbytek napětí způsobený přesycením železa vlivem reakce kotvy

Úbytky napětí jsou velmi malé, proto vnější charakteristika mírně klesá s rostoucím zatížením. Dynamo s cizím buzením je velmi tvrdý zdroj. Výhodou je, že budicí proud nezávisí na zatížení dynama. Výstupní napětí tedy neovlivní úbytky v budícím vinutí. [2]

Charakteristika je v oblasti jmenovitého proudu téměř přímková. Začne se měnit až při větších proudech, kde se již objeví vliv reakce kotvy. [2]

Kompenzační stroje je možné zanedbat úbytek způsobený přesycením železa ΔU_r . Potom vychází přímková charakteristika U' (na Obr. 1.4). [2]

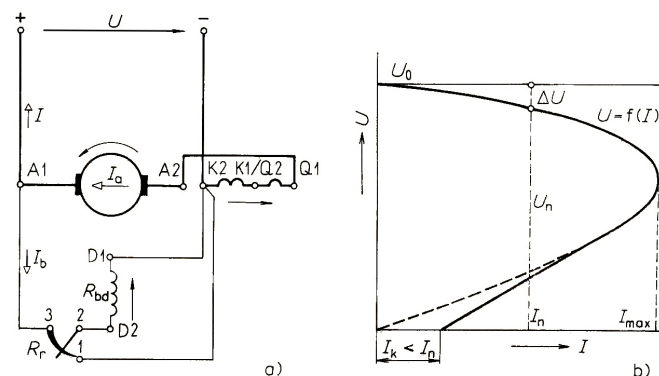
Proud nakrátko I_k u tohoto stroje běžně bývá:

$$I_k = (4 \sim 10) * I_n \quad (1.2)$$

1.5 Derivační dynamo

Kotva derivačního dynama je trvale sériově spojena s kompenzačním (K1, K2) a komutačním (Q1, Q2) vinutím. Tato vinutí jsou zapjena tak, že magnetický tok v těchto vinutích je při každém přepojení stroje opačný než reakční magnetický tok. [2]

Budící vinutí je připojeno paralelně ke kotvě dynama. Je zapojeno tak, aby proud procházel vinutím od svorky D2 ke svorce D1. (Obr. 1.5)



Obr. 1.5: Derivační dynamo: a) schéma, b) vnější charakteristika [2]

V obvodu je zapojen stavitelný odpor R_r , který má odbuzovací kontakt 1. Při vypínání dynamu se spojí budící obvod nakrátko, čímž dojde ke krátkodobému odbuzení dynamu. V případě, že by při vypínání nebylo dynamo odbuzeno, došlo by při rychlém rozpojení obvodu s velkou indukčností k oblouku v místě, kde byl obvod přerušen. Izolace by se vzniklým přepětím mohla poškodit či zničit.

U derivačního dynamu se celkový proud kotvy I_a rozdělí na proud procházející budícím vinutím I_b a proud I dodávaný do sítě. [2]

$$I_a = I + I_b \quad (1.3)$$

Vnější charakteristika je v oblasti jmenovitého proudu podobná charakteristice dynamu s cizím buzením. Napětí na svorkách je jen nepatrně menší než napětí naprázdno U_0 . Při zatížení derivačního dynamu většími proudy klesá napětí rychleji než u dynamu s cizím buzením. S rostoucím zatížením klesá se svorkovým napětím i budící proud. [2] Při těchto podmínkách budící proud odpovídá vztahu:

$$I_a = \frac{U}{R_{bd} + R_r} \quad (1.4)$$

Snížení budícího proudu vyvolá pokles napětí. To znamená, že derivační dynamo je měkčí zdroj než dynamo s cizím buzením. V oblasti jmenovitého proudu je derivační dynamo podobně tvrdý zdroj jako dynamo s cizím buzením. [2]

Derivační dynamo může být zatěžováno pouze do hodnoty maximálního proudu I_{\max} . Při dalším snižování odporu sítě začne proud prudce klesat vlivem klesajícího proudu buzení. [2]

Zkratování obvodu způsobí, že svorkové napětí se rovná nule a tím pádem se i procházející proud bude rovnat nule. Z toho vyplývá, že zanedbáním vlivu remanentního magnetismu se zkratový proud I_k rovná nule. Avšak tento vliv nelze zanedbat. To znamená, že zkratový proud I_k má nějakou hodnotu vycházející z remanentního magnetismu, ale tento proud je menší než jmenovitý proud I_n . Z toho plyne, že derivační dynamo nemůže být zničeno vlivem zkratového proudu. [2]

Napětí derivačního dynama se dá řídit změnou budícího proudu, což se provede změnou odporu budícího vinutí. Maximální napětí se získá vyřazením odporu R_r z buzení (případně jeho zkratováním). Je tedy možné říci, že se zvyšujícím se odporem R_r se snižuje výstupní napětí a naopak snížením odporu R_r se výstupní napětí dynama bude zvyšovat. [2]

Derivační dynamo je nutné spouštět naprázdno, jinak by počáteční proud vyvolaný remanentním magnetismem procházel z větší části vnější sítí (menší odpor a dynamo by se nabuzovalo velmi pomalu). Při malém odporu vnější sítě, např. při zapojení do zkratu by se dynamo nenabudilo vůbec.[2]

Výhodou derivačního dynama je, že nepotřebuje ke svému nabuzení cizí zdroj. Jeho napětí se dá jednoduše a hospodárně řídit.

2 Zapojení dynam v různých vozidlech

Rozeznáváme dvě hlavní zapojení dynam ve vozidlech. V obou případech jde o dynamo s cizím buzením. Tato dynamo mají připojené kotvu i buzení z jednoho zdroje. U těchto zapojení je možné, aby byl spojen s kostrou buď kladný nebo záporný pól dynama. Podle toho je pak nutné navrhnout regulátor dobíjení. Další věcí, co nás bude zajímat, je jestli buzení dynama je napevno spojeno s živým pólem nebo s pólem, který je spojen s kostrou vozidla. Tento parametr je důležitý především při výměně regulátoru dobíjení, který musí být tomu zapojení uzpůsoben.

2.1 Buzení pevně spojeno s živým pólem

V tomto zapojení je dynamo zapojeno k baterii jako dynamo s cizím buzením. Kotva dynama je spojena s buzením živým pólem. Toto spojení je možné pouze za předpokladu že kotva dynama i buzení jsou napájeny ze stejného zdroje. Mezi zástupce tohoto zapojení patří mnoho vozidel. Z automobilů například Škoda 1203. Z motocyklů můžeme zařadit v podstatě všechny motocykly Jawa a ČZ a také motocykly britské značky BSA.

2.2 Buzení pevně spojeno s kostrou vozidla

V tomto zapojení je dynamo zapojeno k baterii jako dynamo s cizím buzením. Kotva dynama je spojena s buzením přes kostru vozidla. To je možné pouze proto, že kotva i buzení jsou napájeny ze stejného zdroje.

Z automobilů do této skupiny patří vozidla Škoda, z britských vozidel například Morris Minor nebo Italská značka Fiat.

Tento typ zapojení je využit také u starších motorů Volvo Penta, které jsou určeny pro pohon menších lodí.

2.3 Zapojení pólů ke kostře

Ve vozidlech se rozeznávají dva typy zapojení pólů ke kostře. Jsou to spojení kladným pólem nebo záporným pólem. Každý ze způsobů má svoje výhody i nevýhody. Popíšeme si zde z jakých důvodů byla vozidla zapojena těmito způsoby.

2.3.1 Záporný pól spojený s kostrou

Výhodou záporné polarity na kostře je, že při obloukovém výboji, který vznikne náhodným zkratem na kostru, je vodič anodou, která se ohřívá rychleji a v důsledku toho se i rychleji utaví. Elektrický oblouk i zkrat trvá kratší dobu a je tedy méně nebezpečný. Elektrolytická koroze v tomto zapojení vzniká hlavně na vodičích a kontaktech regulátoru. V dnešní době je toto zapojení v podstatě jediné používané kvůli rozvoji polovodičových součástek a nových materiálů kontaktů.

2.3.2 Kladný pól spojený s kostrou

Hlavním důvodem užití kladného pólu na kostře vozidla je elektrolytická koroze, která se při tomto zapojení vyskytuje hlavně na kostře vozidla. Toto bylo z hlediska materiálů přijatelnější, neboť koroze vzniká pouze ve vlhkém prostředí. To znamená, že korozi v tomto případě je možné zamezit kvalitním nátěrem nebo využitím nere-zavějící oceli. Dalším důvodem pro použití tohoto zapojení je nižší průrazné napětí a menší opalování středové elektrody na svíčke. V dnešní době se již toto zapojení nepoužívá. Může za to hlavně vývoj polovodičových součástek a materiálů pro výrobu vodičů. Tato skutečnost potom převažuje výhody tohoto zapojení.

3 Možnosti prvotního nabuzení dynama

V této kapitole se budeme věnovat prvotnímu nabuzení dynama, které můžeme provést dvěma způsoby. Jde o nabuzení na hodnotu, která vyvolá ve spojení s otáčením rotoru, na výstupních svorkách dynama požadované napětí.

3.1 Nabuzení vnějším zdrojem

Prvním způsobem je použití dynama s cizím buzením. Toto zapojení není schopno samovolného nabuzení. V tomto případě je nutné použít nějakého vnějšího zdroje, který prvotně nabudí dynamo na potřebnou hodnotu.

3.2 Nabuzení remanentním magnetismem

Při druhém způsobu je na dobu prvotního nabuzení dynamo přepnuto do derivačního zapojení ze zapojení s cizím buzením. To provedeme pomocí spínacího prvku, který připne nepřipojený pól buzení k dynamu. Derivační dynamo lze nabudit bez připojení vnějšího zdroje. Toto nabuzení probíhá za pomoci remanentního magnetismu (zbytkový magnetismus v železném jádru stroje). Roztočením rotoru se začne dynamo postupně nabuzovat. Při dosažení určité hodnoty výstupního napětí rozepne regulátor spínací prvek derivačního režimu. Regulátor potom přechází do aktivního režimu a udržuje konstantní hodnotu výstupního napětí.

4 Průmyslově vyráběné regulátory

Tato část se zabývá regulátory dynam, které se v dnešní době dají koupit. Jsou řešeny dvěma principy. Buď spínacím regulačním relé nebo elektronickým regulátorem.

4.1 Regulační relé

Regulační relé byly do vozidel instalovány jako původní regulátory. Později byly vyvinuty elektronické regulátory.

Regulační relé je zařízení, které spíná a rozpíná obvod buzení podle výstupního napětí dynama. Výstupní svorky z rotoru dynama jsou také vedeny přes regulační relé.

Regulační relé má velkou nevýhodu v mechanickém spínání. To znamená, že má velké opotřebení kontaktů a tím i nízkou životnost.

The diagram illustrates a relay assembly with a reed switch. The upper part is a cross-sectional view of the relay mechanism, showing components labeled $Rk1$, $Rk3$, St , $Sk2$, $Sk1$, Kr , Ri , C , Re , γ , and β . A reed switch is positioned near the relay's armature. The lower part is a schematic of the control circuit, featuring a power source, a switch D , a resistor Ri , and a reed switch $Rk1$ in series with a relay coil Re . Other components in the circuit include a motor M , a resistor Rr , and a switch $Sk1$. The circuit is grounded at several points.

Když se pohybujeme v oblasti nízkých otáček dynama jsou kontakty Sk1 a Sk2 rozpojeny a baterie je odpojena od dynama. Proud prochází proudovým vinutím Ri a napěťovým vinutím Re a pak na kostru stroje. Regulační kontakty Rk1 a Rk2 jsou sepnuty a dynamo je zapojeno tak, že budící proud je maximální. [4]

S rostoucími otáčkami dynama, roste i jeho výstupní napětí. Jakmile dosáhne napětí určité hodnoty sepnou se kontakty Sk1 a Sk2, ale nedojde k plnému přitažení kotvy. Nabíjecí proud prochází z dynama proudového vinutí Ri přes jho a spínací kontakty Sk1 a Sk2 do baterie. [4]

19

a tím i výstupní napětí dynama, kotva se opět oddálí a proces se opakuje. Relé pracuje v prvním regulačním stupni. [4]

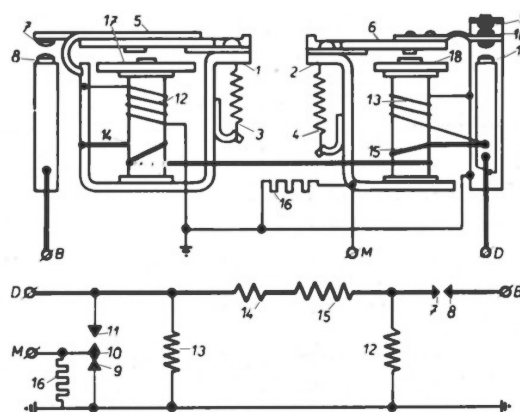
Pokud se zvětší otáčky přes maximální hodnotu pro první regulační stupeň, tak už nestačí zařazení odporu R_r . Napětí na výstupu dynama je stále větší a kotva je přitahována stále větší silou, takže je přitažena více než na předchozím stupni. Sepnou se kontakty Rk2 a Rk3 a uzavřou okruh buzení nakrátko a napětí na výstupu dynama, což rozepne kontakty Rk2 a Rk3 a cyklus se opět opakuje. [4]

Při prudkém poklesu otáček dynama začne protékat zpětný proud z baterie, který protéká napěťovým vinutím R_e , což by mělo kotvu přitahovat, avšak tento proud prochází i vinutím proudovým R_i . Toto vinutí ruší silové účinky napěťového vinutí, proto kotva elektromagnetu odpadne a rozpojí i kontakty Sk1 a Sk2, což odpojí dynamo od akumulátoru. [4]

4.1.2 Dvoukotvové regulační relé

Regulační relé se dvěma kotvami pracuje ve třech režimech v normálním, prvním regulačním stupni a druhém regulačním stupni.

Pri nízkých otáčkách dynama se pohybujeme v oblasti normálního režimu, kde je svorkové napětí dynama nižší než napětí baterie. V tomto případě prochází budící proud přes jho regulátoru na kotvu 6 a sepnuté kontakty 10 a 9 a poté se vrací do dynama kostrou vozidla. Zároveň s budícím proudem prochází také proud napěťovým vinutím 12 a 13. Síla působící na kotvy 5 a 6 je malá, proto nedojde k sepnutí kontaktů. [4]



Obr. 4.2: Schéma dvoukotvového regulačního relé [4]

Při zvýšení otáček dynama přecházíme do mezního režimu. Kontakty 7 a 8 se sepnou a dynamo začne nabíjet akumulátor. Ale dynamo je pořád buzeno plným proudem. [4]

Při dalším zvýšení otáček dynama se nacházíme na prvním regulačním stupni. Překonáním síly pružiny 4 elektromagnetickou silou vyvolanou cívkou 13 dojde k rozepnutí kontaktů 9 a 10, ale ještě nedojde k sepnutí kontaktů 10 a 11. Budící proud tedy už neprochází přímo na kostru vozidla, ale prochází ještě přes regulační rezistor 16. Výstupní napětí dynama poklesne a tím poklesne i síla vyvolaná vinutím 13 a dojde k oddálení kotvy 6. Opět se spojí kontakty 9 a 10 a celý cyklus se opakuje. [4]

Pokud dojde k dalšímu zvýšení otáček dynama, regulační relé přechází do druhého regulačního stupně. Regulační rezistor už není schopen dostatečně snížit napětí na výstupu dynama. Napětí přesáhne nastavenou mez a dojde ještě k většímu přitažení kotvy 6 a spojení kontaktů 10 a 11. Tyto kontakty spojí budící obvod dynama nakrátko, což znamená, že přes buzení neprochází proud, napětí poklesne a oddálí se kotva 6 a cyklus se opakuje. [4]

4.2 Elektronický regulátor

Elektronický regulátor byl vytvořen za účelem náhrady regulačního relé, neboť toto relé vykazovalo vysokou míru mechanického opotřebení jiskřením na kontaktech. Dlouhodobým využíváním začaly regulační relé vykazovat velmi vysokou míru nespolehlivosti. Z tohoto důvodu byly elektronické regulátory další logickou volbou. Spíše bychom mohli říci, že přechod z regulačního relé na elektronické regulátory se stal nutností.

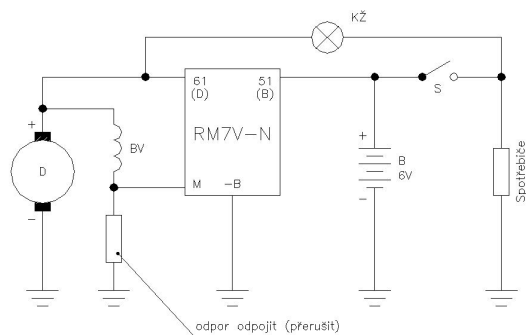
4.2.1 Komerčně dostupné elektronické regulátory

Elektronické regulátory se v České republice vyrábějí v několika základních provedeních. Zde budou zmíněny dva z nich. Oba regulátory se vyrábí v Kroměříži. Typ AEV je vyráběn stejnojmennou firmou a typ RM/MR vyrábí firma Elkomp.

Tyto regulátory mají velmi velkou nevýhodu. Nedokážou samostatně nabudit dynamo bez akumulátoru nebo regulátor začne pracovat až při vysokých otáčkách dynama.

Regulátor RM/MR

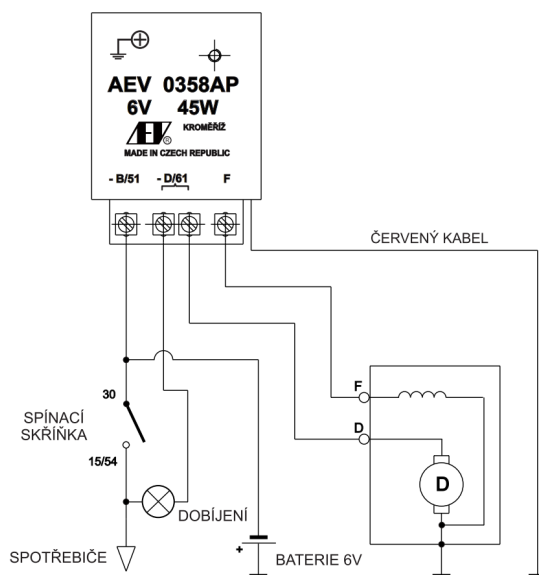
Tento regulátor je velmi rozšířený mezi majiteli veteránů, bývá označován buď RM nebo MR. Regulátor je vyroben pro zapojení, kdy je buzení spojeno s živým pólem dynama. Avšak konstrukce tohoto regulátoru není optimální. V zapojení tohoto regulátoru jsou relativně velké nedostatky. Jedním z problémů tohoto regulátoru je, že neumí nabudit dynamo bez baterie. Další nevýhodou je, že nemá zabudovanou ochranu proti přetížení. Typicky se vyrábějí typy: MR7V-N, MR7V-P, RM7V-N



Obr. 4.3: Elektronický regulátor RM7V-N [5]

a RM7V-P. Jsou to regulátory pro motocykly s napětím akumulátoru 6 V. Pro vozidla s 12 V akumulátorem se vyrábějí ekvivalentní regulátory s označením 14V například MR14V-N. Písmena P a N v typových názvech regulátorů určují, zda je na kostře připojen kladný nebo záporný pól. Písmeno P znamená, že je ke kostře připojen kladný pól akumulátoru a dynama. Písmeno N znamená, že je ke kostře připojen záporný pól akumulátoru a dynama. Firma Elkomp už nevyrábí řadu MR, ale pouze řadu RM, která je uzpůsobena i pro regulaci alternátorů.

Regulátor AEV



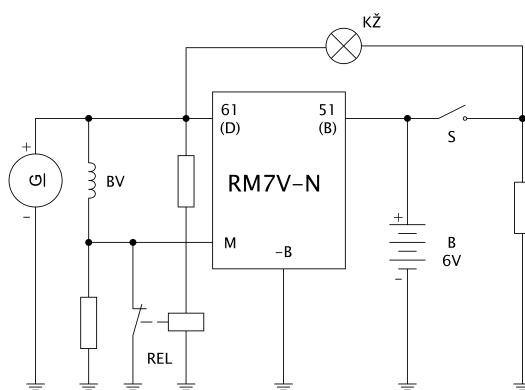
Obr. 4.4: Elektronický regulátor AEV [6]

Regulátor AEV je propracovanější než regulátor RM/MR, neboť má zabudovanou ochranu proti přetížení. Firma AEV vyrábí regulátory jak pro spojení buzení dynama s kostrou stroje, tak pro spojení buzení dynama s živým pólem dynama.

Avšak i u tohoto typu regulátoru je problém, že regulátor nezačne pracovat, dokud se nenabudí dynamo. To znamená, že buď dynamo musí pracovat s akumulátorem nebo se musí roztočit na velmi vysoké otáčky, aby se vlivem remanentního magnetismu zvýšilo napětí na kotvě a regulátor začal pracovat. Potom už se mohou otáčky dynama snížit a regulátor udržuje napětí na konstantní hodnotě. Firma AEV vyrábí mnoho typů regulátorů (s mínusovou i plusovou regulací, pro ukostřené + i -, pro napětí 6 i 12 V akumulátoru).

4.2.2 Řešení nedostatků komerčních regulátorů

Pokud je požadavkem ošetření nedostatků komerčních regulátorů, je potřeba dodělat k regulátorům detaily odstraňující popsané chyby.



Obr. 4.5: Regulátor RM s přídavným relé

Jak ošetřit chybu pro nabuzení dynama i na volnoběh v případě nízkých otáček dynama? Odpověď je poměrně snadná. Asi nejjednodušším způsobem je zařazení rozpínacího relé do obvodu buzení, které spojuje dynamo do derivačního zapojení. Toto relé má spojený rozpínací kontakt do té doby, dokud není na cívce relé dostatečné napětí, aby se přitáhla kotva a rozeplnul se kontakt relé. Toto relé sepne jednou za dobu činnosti regulátoru, proto není překážkou spolehlivost a opalování kontaktů je zde zanedbatelné.

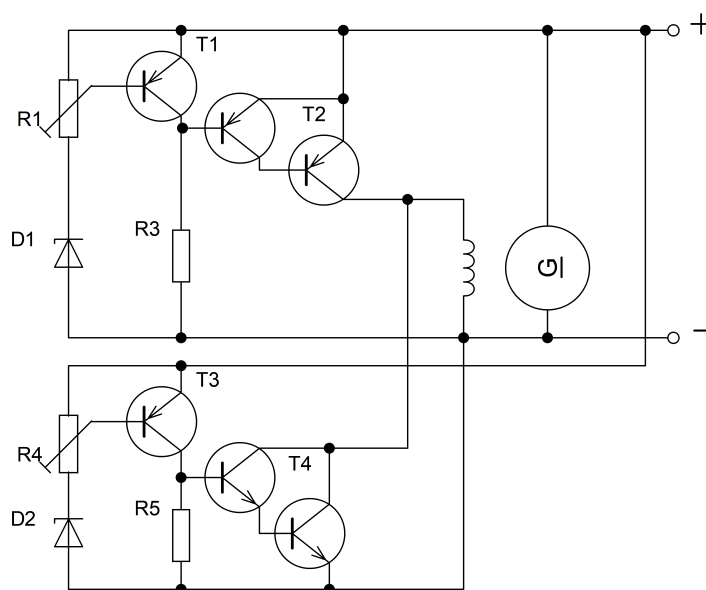
Jak ošetřit chybu regulátoru RM s ochranou proti přetížení? Odpověď na tuto otázku není pouze jedna. Existuje více možností, jak zařídit, aby nedošlo k přetížení regulátoru a případně až jeho zničení. Tato chyba je v podstatě neopravitelná jednoduchým způsobem. Nadproudovou ochranu je možné ošetřit pojistkou příslušné velikosti, ale není to úplně vhodné, protože není snadno zjistitelné zda regulátor stále pracuje nebo jestli je spálená pojistka. Dalším způsobem řešení je vytvoření nějakého proudového omezovače, na který však ve většině případů není místo.

5 Amatérsky realizované regulátory

Mimo průmyslově vyráběných regulátorů se můžeme setkat na internetu s mnoha verzemi elektronických regulátorů. Tyto regulátory můžeme rozdělit do tří skupin:

- dvoustavová regulace
- spojitá regulace
- regulace s PWM

5.1 Dvoustavová regulace



Obr. 5.1: Schéma dvoustavové regulace

Dvoustavová regulace pracuje v nespojitém režimu. To znamená, že budícím vinutím prochází buď maximální nebo nulový budící proud.

Tento typ regulátoru přímo vychází z původních regulačních relé. Proto má dvě části regulace.

Principiální schéma zapojení dvoustavové regulace je možné vidět na Obr 5.1.

Ze zapojení je vidět, že v okamžiku rozběhu dynama je tranzistor T1 rozepnutý a tranzistor T2 je sepnutý. Jakmile výstupní napětí dynama přesáhne napětí Zenerovy diody, dojde na ní k průrazu a tranzistor T1 se otevírá a tranzistor T2 se zavírá a tím dochází k odbuzování dynama.

Při rozběhu dynama jsou tranzistory T3 a T4 rozepnuté. Reagují až tehdy, když výstupní napětí dynama přesáhne hodnotu Zenerovy diody, na které opět dochází

Spínání tranzistorů T1 a T3 musí být nastaveno tak, aby tranzistor T1 spíнал dříve, než sepne tranzistor T3. To provedeme nastavením trimrů R1 a R4. Kdyby došlo k současnému sepnutí tranzistorů T1 a T3, došlo by k mžikovému zkratu dynamu a s velkou pravděpodobností by došlo ke zničení regulátoru, konkrétně tranzistorů T2 a T4.

[illegible]

Spojité regulace je založena na plynulé změně proudu do buzení dynamu.

Při rozběhu dynama se otevírá tranzistor T3. Když se zvyšují otáčky dynama, tak se tranzistor T3 stále více otvírá, až dojde k plnému otevření. Dále narůstá napětí na výstupu dynama. Avšak při překročení průrazného napětí Zenerovy diody D2 dojde skokově k sepnutí tranzistoru T2 a tím k rozepnutí tranzistoru T3 a odbuzení dynama a poklesu napětí na kotvě dynama.

25

5.3 Regulace s PWM

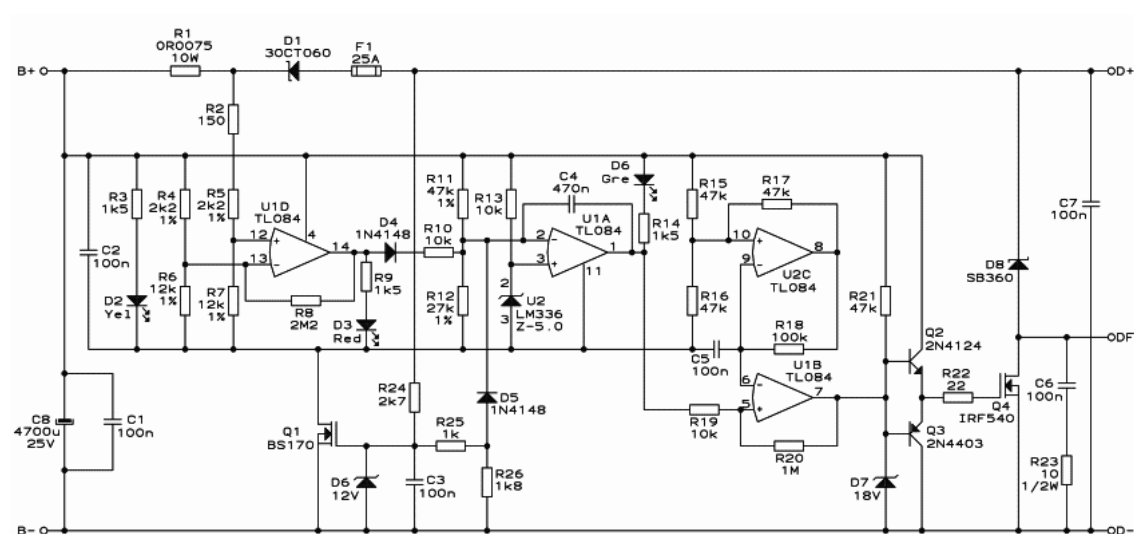
Regulace s PWM je založena na spojitě změně šířky pulsu, kterým se spíná přes spínací prvek budící proud.

Tento konkrétní amaterský regulátor je založen na analogovém řízení šířky pulsu a je možné ho vidět na Obr. 5.3.

Skládá se z operačních zesilovačů $U1A$ a $U1D$, které pracují jako regulátory proudu a napětí.

OZ $U2C$ je zapojen jako generátor pilového signálu, jehož výstup je připojen k invertujícímu vstupu komparátoru $U1B$

OZ $U1B$ tvoří společně s rezistory $R19$ a $R20$ komparátor s hysterezí. Vytváří obdélníkový signál, který spíná přes tranzistory $Q2$ a $Q3$ tranzistor $Q4$.



Obr. 5.3: Schéma zapojení pulsní regulace [8]

Tranzistor $Q1$ má funkci spoutěče regulátoru. To znamená, že připojí záporný pól napájení operačních zesilovačů k zápornému pólu akumulátoru při napětí asi 6 V.

Změnou výstupního napětí dynama (například změnou otáček) se na regulátoru $U1A$ změní výstupní napětí a komparátorem $U1B$ se změní šířka spínacího pulsu tranzistorů a je opět doladěno výstupní na požadovanou hodnotu.

Při zvýšení výstupního proudu se změní napětí mezi piny 12 a 13 OZ $U1D$ a dojde ke změně reference regulátoru $U1A$ a tím opět ke změně šířky pulsu, který vyvolá snížení výstupního napětí.

6 Možnosti měření proudu

Pro regulátor je nutné také měřit proud procházející regulátorem a případně tento proud vyhodnocovat, aby nedošlo k překročení maximálních hodnot součástek. Bez měření a vyhodnocení velikosti proudu by mohlo dojít ke zničení samotného regulátoru.

Měření proudu je možné realizovat pomocí čtyř metod, které se dělí do dvou skupin, na stejnosměrné a střídavé měření. Stejnosměrné měřicí metody jsou schopny změřit stejnosměrné i střídavé složky proudu a mezi stejnosměrné metody patří bočník a čidlo s Hallovou sondou. Střídavé metody jsou schopny měřit pouze střídavé složky proudu a mezi střídavé metody patří měřicí transformátor proudu a Rogowského cívka. Tato práce však uvažuje pouze stejnosměrné metody z důvodu použití stejnosměrného stroje.

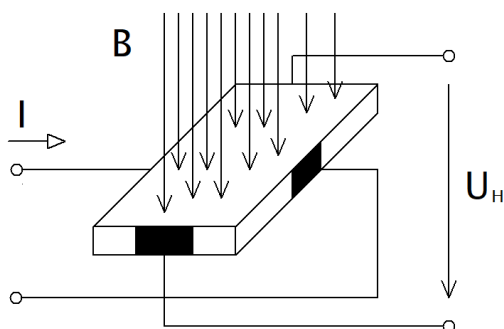
6.1 Bočník

Bočník se nejčastěji používá ke zvětšení rozsahu ampérmetru. Je možné ho však použít také k měření proudu na daném prvku obvodu.

Bočník je výkonový rezistor o velmi malé hodnotě odporu. Připojuje se paralelně k měřenému prvku. Často má formu pouze kovových pásků. Hodnoty maximálního proudu bočníkem se mohou pohybovat od jednotek ampérů až po stovky ampérů.

Jelikož odpor bočníku je známý a konstantní, je známo, že napětí je v lineární závislosti k proudu. Na bočníku je možné změřit napětí voltmetrem a proud spočítat pomocí Ohmova zákona.

6.2 Čidlo s Hallovou sondou



Obr. 6.1: Princip Hallový sondy

Čidlo s Hallovou sondou pracuje na principu Hallova jevu a k zesílení výstupního signálu využívá zesilovač.

Hallův jev vzniká v důsledku Lorenzovy síly, která působí na náboj pohybující se v magnetickém poli. Pokud prochází stejnosměrný elektrický proud plochou destičkou z vodivého materiálu a v kolmém směru na pohybující se částice působí magnetická indukce, jsou tyto částice vychylovány v příčném směru, kde se vlivem hromadění začne vytvářet kladný elektrický potenciál a vzniká takzvané Hallovo napětí. [9]

Výstupní Hallovo napětí U_h dosahuje pouze velmi malých hodnot v oblasti jednotek mV . Vlivem rušení nebo vnějšího šumu může dojít k tomu, že Hallovo napětí zanikne v šumu. Proto se používají pro přívod k Halloovým sondám kroucené vodiče, které dokážou odrušit šum a potom na výstupu z těchto vodičů vidíme čisté Hallovo napětí.

7 Požadavky na nově realizovaný regulátor

Pokud je účelem návrhu úplně nový regulátor, je nutné uvažovat všechny klady i nedostatky dříve vyvinutých regulátorů. Při návrhu nového regulátoru nehraje roli jestli klady a zápory bereme z elektronických regulátorů nebo regulačních relé, potřebujeme znát a ošetřit všechny nedostatky a zároveň využít všechny jejich výhody.

Sumarizací veškerých poznatků získaných v kapitolách 4, 5 a 6, byly získány vlastnosti, které jsou požadovány od regulátoru. Tyto požadavky jsou:

- Nabuzení dynamicky bez akumulátoru
- Použití polovodičů
- Bezztrátová regulace
- Variabilita zapojení buzení
- Variabilita pólu na kostře
- Rychlost a přesnost regulace
- Ochrana proti přepětí
- Ochrana proti proudovému přetížení
- Elektromagnetická kompatibilita
- Konstantní napětí
- Maximální proud do buzení
- Rozměry regulátoru

7.1 Nabuzení dynama bez akumulátoru

Nabuzení dynama bez akumulátoru je velmi důležitý požadavek, neboť se může stát, že na vozidle nebude akumulátor nebo bude akumulátor vybitý.

Nabudit dynamo bez akumulátoru jde pouze derivačním zapojením dynama. Toto zapojení je možné realizovat spojením relé nebo polovodičovým spínacím prvkem, který je sepnutý i při napětí 0 V. Tyto prvky po nabuzení dynama rozepínají derivační zapojení a začne pracovat regulátor.

7.2 Použití polovodičů

Požadavek na to, aby nově realizovaný regulátor byl elektronický je logický, neboť se tím vyhneme opalování kontaktů a spínacím ztrátám, které by obsahoval mechanický regulátor.

7.3 Bezztrátová regulace

Velmi důležitým požadavkem je také bezztrátovost regulace. Avšak regulace úplně bez ztrát je prakticky nemožná, můžeme se ale snažit se bezztrátové regulaci přiblížit jak nejvíce dovedeme. Nejblíže se k tomuto ideálu dostáváme při použití regulátoru s PWM, kde ztráty na tranzistorech a operačních zesilovačích jsou velmi nízké.

7.4 Variabilita zapojení buzení a pólu na kostře

Ideální myšlenkou při vytváření nového regulátoru je, aby byl univerzální, tedy použitelný pro všechna zapojení buzení i pólů ke kostře.

Variabilitu zapojení lze vyřešit různými způsoby. Jedním z nich je zařazení přepínačů na jedné univerzální desce, která bude fungovat pro všechna zapojení při správném sepnutí přepínačů. Další možností, jak vytvořit univerzální regulátor, je vytvoření více desek, kde každá deska bude pro určité zapojení. To ovšem znamená, že se nebude již jednat o jeden univerzální regulátor, ale o několik regulátorů pracujících samostatně.

7.5 Rychlost a přesnost regulace

Mezi požadavky na nový regulátor také patří dostatečná rychlost a přesnost regulace výstupního napětí a proudu, aby nedocházelo ke zbytečným překmitům nebo příliš

dlouhé době regulování na ustálenou hodnotu nebo příliš velkému zvlnění ustálené hodnoty.

7.6 Ochrana proti přepětí

Potřebným požadavkem při návrhu regulátoru bude i ochrana proti příliš vysokému napětí, což můžeme zajistit některým ze známých polovodičových ochranných prvků. Mohou se použít například varistor, transil nebo trisil, které dokážou omezit napěťové špičky, které mohou na dynamu vzniknout.

7.7 Ochrana proti proudovému přetížení

Při návrhu regulátoru je nutné uvažovat, že dojde k překročení (přiblížení se) proudového maxima. To znamená, že musíme také nějak ošetřit snížení proudu, aby nedošlo ke zničení regulátoru.

Toto omezení realizujeme buď rezistorem o nízké hodnotě v hlavní proudové dráze, ke kterému je připojen komparátor, který nastavuje dále hodnoty na regulátoru, aby nedošlo k jeho přetížení. Nebo je možné připojit do obvodu Hallovu sondu a k ní nějaký vyhodnocovací prvek, který opět způsobí reakci regulátoru a dojde ke snížení budícího proudu tedy i výstupního proudu.

Dynama s různým výkonem mají různý maximální proud hlavní proudovodnou dráhou dynama. Například pokud bude motocyklové dynamo se jmenovitým napětí sítě 6 V a jmenovitým výkonem 60 W je třeba uvažovat proudové omezení regulátoru na hodnotu asi 9 A.

7.8 Elektromagnetická kompatibilita

Požadavek na elektromagnetickou kompatibilitu znamená, že objekt musí být odolný vůči elektromagnetickým vlnám a jejich interferencím a zároveň nesmějí vyzařovat žádné elektromagnetické vlny, které by ovlivnily nebo znemožnily funkci dalších zařízení v okolí daného regulátoru.

Splnění tohoto požadavku se provádí tak, že se zakrytuje regulátor nějakým materiálem (měděná/mosazná klec, plechová krabice), který snižuje intenzitu nebo úplně stíní dané elektromagnetické vlnění.

7.9 Konstantní napětí

Požadavek na konstantní dodávané napětí je opodstatněný, neboť čím přesnější a konstantnější napětí budeme dodávat, tím lépe bude pracovat v systému elektroinstalace. Toto napětí je regulátorem dáno u 12 V sítě na 14,2 – 14,6 V a u 6 V sítě je dán asi na 7,3 V. Těchto hodnot se držíme, neboť se jedná o hodnoty plně nabitých akumulátorů.

7.10 Maximální proud do buzení

Požadavek na maximální proud do buzení je zařazen z důvodu materiálové odolnosti. Výrobce AEV udává maximální budící proud 4 A jak pro 12V dynama tak pro 6 V dynama. [6] Jelikož se elektrický odpor dynama pohybuje mezi 6 a 10 Ω , tak není problém s budícím proudem 4 A.

7.11 Rozměry regulátoru

Pro návrh regulátoru je nutné uvažovat i jeho výsledné rozměry, aby bylo zajištěno dostatečné chlazení, dostatečné izolační mezery a dostatečná tloušťka proudvodných drah. Musíme také uvažovat, že na vozidlech na která bude regulátor instalován nebude příliš mnoho místa. Musí tedy mít přibližně podobné rozměry jako původní regulátor (regulační relé) instalovaný ve vozidle.

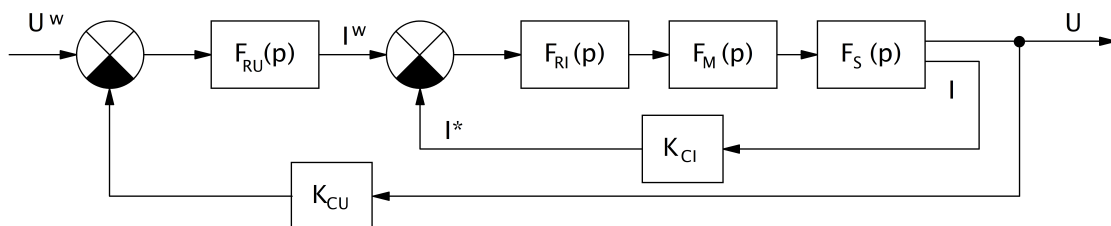
8 Návrh zapojení regulátoru

Tato část obsahuje průběh návrhu zapojení regulátoru s různými verzemi. Celý proces návrhu obsahuje průběh od blokového schématu přes vývojová zapojení až k finálnímu zapojení. Pro návrh schématu bylo uvažováno s návrhem regulátoru který bude regulovat výstupní napětí dynama pomocí PWM.

8.1 Blokové schéma

Pro návrh samotného zapojení regulátoru bylo nejprve nutné navrhnout blokové schéma, které co nejlépe odpovídá blokově celé plánované soustavě. Blokové schéma má několik částí ve kterých je nutno si uvědomit co budou obsahovat.

Regulátor napětí je regulátor, který reaguje na změnu napětí na výstupu regulované soustavy. Při návrhu blokového schématu byl uvažován jako proporcionálně-integrační regulátor s jednotkovým zesílením.



Obr. 8.1: Blokové schéma

Regulátor proudu reaguje na změnu proudu tekoucího ze soustavy do zátěže, kterou může představovat nedostatečně nabitý akumulátor nebo napájení přísrojů a světel. Byl uvažován rovněž proporcionálně-integrační regulátor.

Jako čidlo proudu byl ze začátku uvažován Hallův senzor, avšak byl nakonec použit bočník se zesilovačem hlavně z důvodu mnohem nižší ceny.

Jako čidlo napětí byl použit prostý odporový dělič napětí s nastavitelným zesílením.

Soustava obsahuje převodník signálu regulátorů na signál PWM a samotné dynamo pro které je celý regulátor uvažován. To znamená, že pomocí řízení budícího proudu získáme magnetickou indukci napětí a proud na kotvě dynama, které udávají zpětnou vazbu.

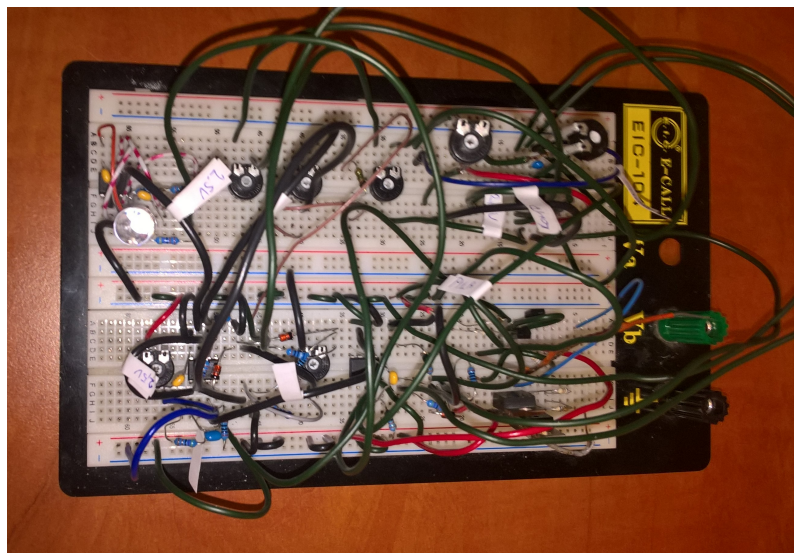
8.2 Návrh zapojení regulátoru

Návrh prvotního zapojení je vyobrazen v příloze A.1. Tento návrh byl shledán jako nedostatečný a příliš složitý, proto od něj nakonec bylo ustoupeno.

Schéma výsledného návrhu regulátoru je možné vidět v příloze A.2. U tohoto zapojení je použito několik hlavních konstrukčních i funkčních změn oproti prvotnímu zapojení:

- použití filtračních kondenzátorů k integrovaným obvodům,
- použití pouze jednoho bočníku,
- použití diferenciálního zesilovače jako čidla proudu,
- použití komparátoru LM311,
- použití nesymetrických OZ LM358 pro čidlo proudu, napěťový a proudový regulátor a napěťovou referenci 2,5 V,
- zvýšení frekvence spínání z 300 Hz na 50 kHz.
- použití filtračního kondenzátoru na vyhlazení výstupního napětí z dynama,
- použití nulových diod,
- použití pouze jednoho MOS-FET tranzistoru,
- použití ochranných varistorů.

Praktické zapojení bylo nejprve testováno na kontaktním poli, které pro stejnosměrné testování a ověření funkčnosti bylo naprosto dostačující. Toto zapojení mělo svoje výhody, ale samozřejmě i nevýhody. Velkou výhodou byla snadnost přepojování součástek a rychlejší výměna vadných kusů. Nevýhodami této realizace však byly nemožnost použití na reálném stroji a velká nepřehlednost zapojení.



Obr. 8.2: Zapojení na kontaktním poli

Pro pozdější praktické zkoušky při rozběhnutém stroji a vzniklých vibracích už nebylo možné použít kontaktní pole neboť vlivem vibrací ztácelo kontakty se součástkami a vodiči. Pro funkční zkoušky před návrhem DPS bylo použito uneverzální pájecí desky, která již nebyla téměř ovlivněna vibracemi roztočeného stroje. Toto zapojení ovšem nevyřešilo samotnou nepřehlednost zapojení. To mohl vyřešit pouze návrh DPS.

Ve finálním návrhu zapojení bylo postupováno podle poznatků zjištěných při experimentálním testování prvotního návrhu.

Dále budou uvedeny důvody změn a zjednodušení jednotlivých částí prvotního návrhu. Tyto důvody mají vždy svoje opodstatnění ať už je to pořizovací cena součástek nebo samotná vhodnost jednotlivých součástek a celků.

8.2.1 Filtrační kondenzátory integrovaných obvodů

Filtrační kondenzátory jsou u integrovaných obvodů použity z důvodu jejich ochrany a zajištění správného chování. Kondenzátory zachytávají přepětové a podpětové špičky. Dalším důvodem je zajištění konstantního napájecího napětí, aby vlivem zvlněného napětí na OZ nedošlo k jeho nestandardnímu chování.

8.2.2 Bočník

Bočník je zde použit oproti prvotnímu zapojení pouze jeden. Je připojen na svorky Z a K. Zapojení svorek Z a K k bočníku je závislé na pólu, na kterém je bočník. V případě nutnosti přepojení bočníku na opačný pól je nutné mezi sebou zaměnit svorky Z a K.

8.2.3 Diferenciální zesilovač

Diferenciální zesilovač byl použit z důvodu větší vhodnosti než proporcionální zesilovač. Diferenciální zesilovač je vhodnější z důvodu dobrého nastavování zesílení a vyšší přesnosti výstupního napětí při daném zesílení. Zesílení diferenciálního zesilovače je dáno známým maximálním rozdílem vstupních napětím $OZ3$ a maximálním výstupním napětím $OZ3$.

8.2.4 OZ LM358 místo TL082

Po zkouškách na operačních zesilovačích TL082 bylo z praktického hlediska zvoleno jiných operačních zesilovačů. Operační zesilovače TL082 jsou primárně určeny pro symetrické napájení, což je v obvodu nevyhovující. Byly zvoleny operační zesilovače LM358, které jsou určeny jak na symetrické tak nesymetrické napájení. Tyto zesilovače mají horší parametry než operační zesilovače TL082, ale lépe pracují při malých napájecích napětích. Rozsah výstupního napětí při napájení operačního zesilovače byl u typu LM358 od 250 mV po 5,1 V, kdežto u typu TL082 pouze od 1,04 V po 5,1 V. Ideální by bylo použití nesymetrických operačních zesilovačů TLC272, které mají nejvhodnější časové konstanty a rozsah výstupního napětí (0,1 V – 5,1 V) pro toto řešení. Od typu TLC272 bylo upuštěno z důvodu jeho vysoké ceny, která byla oproti typu LM358 přibližně osminásobně vyšší. Ukázalo se praktickým testováním, že je OZ LM358 naprosto dostačující. OZ byl ponechám pouze u generátoru trojúhelníkového signálu, kde nezpůsobil žádné potíže.

8.2.5 Zvýšení frekvence

Zvýšení frekvence z 300 Hz na 50 kHz bylo provedeno z důvodu menší náchylnosti regulátoru proudu na nastavení jeho zesílení a časové konstanty. Pro vytvoření univerzálního regulátoru je vysoká frekvence podmínkou. Dalším důvodem je posun spínací frekvence mimo slyšitelné pásmo.

8.2.6 Filtrační kondenzátor výstupního napětí

Filtrační kondenzátor je připojen paralelně ke kotvě dynama z důvodu snížení až odstranění zvlnění výstupního napětí. Tento kondenzátor je dimenzován podle nominálního provozního stejnosměrného napětí. Nominální napětí kondenzátoru se volí minimálně dvojnásobné oproti nominálnímu provoznímu napětí dynama z důvodu napěťových špiček, které mohou vzniknout na dynamu. Velikost kapacity kondenzátoru se volí podle velikosti zvlnění výstupního napětí dynama. Jeho velikost určuje maximální proud protékající kotvou dynama, frekvence měniče a zvlnění výstupního napětí podle vztahu:

$$C_f = \frac{I_{max}}{2 * f_M * \Delta U} \quad (8.1)$$

8.2.7 Nulové diody

Nulovací diody jsou použity paralelně k budicímu vinutí. Dvě nulové diody jsou použity z důvodu, že buzení může být spojeno s kladným i záporným pólem, proto jsou zapojeny jak na kladném, tak na záporném pólu. Nulové diody slouží k demagnetizaci budicího vinutí.

8.2.8 Jeden MOS-FET

V původním zapojení byly použity dva tranzistory, které sloužily ke spínání různě zapojených vinutí. Jeden MOS-FET je použit pro obě zapojení, ať už spojení buzení s kladným pólem nebo spojení buzení se záporným pólem. Použití jednoho MOS-FET tranzistoru místo dvou je možné z toho důvodu, že se zde jedná o spínání buzení s malým odporem, proto tedy nedošlo ke zkreslení napětí na gate tranzistoru. Kdyby šlo o spínání větší odporové zátěže, nedocházelo by ke správnému spínání.

8.2.9 Ochranné varistory

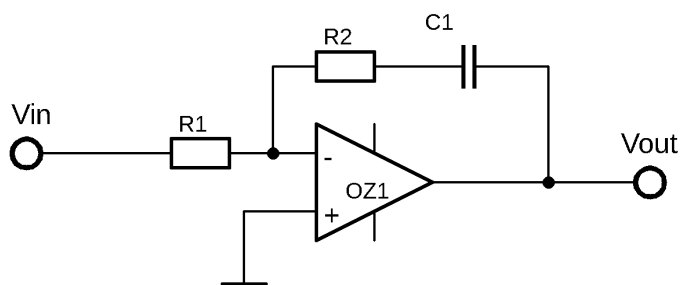
Varistory jsou součástky, u kterých při zvýšení napětí nad nominální hodnotu dochází k prudkému snížení jejich elektrického odporu.

Jsou zde použity pouze pro ochranu součástek se jmenovitým napětím pod 18 V. Varistory omezují napětí při překročení vlastního nominálního napětí. Konkrétně chrání především integrované obvody.

9 Návrh regulátorů

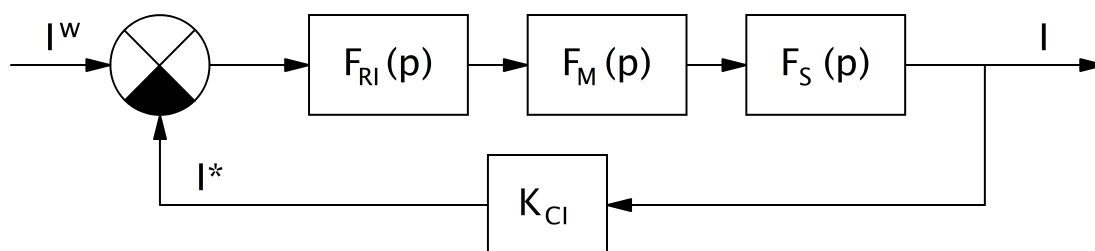
Tato kapitola se zabývá návrhem proudových a napěťových regulátorů obvodu. Proudové a napěťové regulátory musí být předběžně navrženy a vyzkoušeny. Obvykle je nutné také doladit parametry těchto regulátorů.

9.1 Návrh proudového regulátoru



Obr. 9.1: Zapojení PI regulátoru s OZ

Tato kapitola se zabývá návrhem proudového regulátoru, který byl vytvořen a uvažován jako proporcioválně-integrační, což vychází z regulační smyčky. Při návrhu však nastal problém. Každé dynamo má jiné časové konstanty, a proto byl zvolen experimentálně kompromis. Nejpožívanější dynama jsou výkonů 150W, 200W a 250W. Regulační smyčku je možné vidět na Obr. 9.2.



Obr. 9.2: Regulační smyčka pro všechna dynama

9.1.1 Návrh proudového regulátoru 150W dynama

Tato část obsahuje návrh proudového regulátoru na 150W dynama a výpočet konkrétních parametrů.

Naměřené parametry 150W dynama pro výpočet regulátoru:

$$L_b = 12,45mH$$

$$R_b = 4,81\Omega$$

Výpočet přenosů proudového regulátoru:

$$K_M = \frac{U_d}{U_{\check{r}}} = \frac{14,5}{5,1} = 2,84 \quad (9.1)$$

$$\tau_M = \frac{1}{2 * f_m} = \frac{1}{2 * 50 * 10^{-3}} = 1 * 10^{-5}s \quad (9.2)$$

$$F_M(p) = \frac{K_M}{1 + p\tau_M} = \frac{2,84}{1 + p * 1 * 10^{-5}} \quad (9.3)$$

$$\tau_B = \frac{L_B}{R_B} = \frac{12,45 * 10^{-3}}{4,81} = 2,588 * 10^{-3}s \quad (9.4)$$

$$F_B(p) = \frac{\frac{1}{R_b}}{1 + p\tau_B} = \frac{0,208}{1 + p * 2,588 * 10^{-3}} \quad (9.5)$$

$$K_{CI} = \frac{U_{out}}{I_{IN}} = \frac{5,1}{12} = 0,425 \quad (9.6)$$

$$F_s(p) = K_{CI} * F_B(p) * F_M(p) \quad (9.7)$$

$$F_s(p) = 0,425 * \frac{0,208}{1 + p * 2,588 * 10^{-3}} * \frac{2,84}{1 + p * 10^{-5}} \quad (9.8)$$

$$F_s(p) = \frac{0,251}{(1 + p * 2,588 * 10^{-3}) * (1 + p * 10^{-5})} \quad (9.9)$$

$$F_{OM}(p) = \frac{1}{2 * \tau_\sigma p * (\tau_\sigma p + 1)} \quad (9.10)$$

$$F_{RI}(p) = F_{OM}(p) * \frac{1}{F_s(p)} \quad (9.11)$$

$$F_{RI}(p) = \frac{(1 + p * 2,588 * 10^{-3}) * (1 + p * 10^{-5})}{2 * 10^{-5} * p * (10^{-5} * p + 1) * 0,251} \quad (9.12)$$

$$F_{RI}(p) = \frac{1}{5,02 * 10^{-6} * p} + \frac{2,588 * 10^{-3}}{5,02 * 10^{-6}} \quad (9.13)$$

$$F_{RI}(p) = \frac{1}{5,02 * 10^{-6} * p} + 515,54 \quad (9.14)$$

Výpočet hodnot součástek z přenosu regulátoru:

$$F_{RI}(p) = \frac{1}{R_1 * C_1 * p} + \frac{R_2}{R_1} \quad (9.15)$$

$$R_1 * C_1 = 5,02 * 10^{-6} \quad (9.16)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 515,54 \quad (9.17)$$

Takovýto výpočet se provádí pomocí učení hodnoty jedné součástky, například rezistoru, a následného dopočítání zbylých parametrů. Pokud zvolíme velikost odporu R_1 $4,7 \Omega$, vychází hodnoty C_1 a R_2 následovně.

$$C_1 = \frac{5,02 * 10^{-6}}{R_1} = \frac{5,02 * 10^{-6}}{4700} = 1,068 nF \quad (9.18)$$

$$R_2 = 515,54 * R_1 = 515,54 * 4700 = 2,423 M\Omega \quad (9.19)$$

9.1.2 Návrh proudového regulátoru 200W dynama

Tato část obsahuje návrh proudového regulátoru na 200W dynama a výpočet konkrétních parametrů.

Změřené parametry 200W dynama pro výpočet regulátoru:

$$L_b = 21,3 mH$$

$$R_b = 5 \Omega$$

Výpočet přenosů proudového regulátoru:

$$K_M = \frac{U_d}{U_f} = \frac{14,5}{5,1} = 2,84 \quad (9.20)$$

$$\tau_M = \frac{1}{2 * f_m} = \frac{1}{2 * 50 * 10^{-3}} = 1 * 10^{-5} s \quad (9.21)$$

$$F_M(p) = \frac{K_M}{1 + p\tau_M} = \frac{2,84}{1 + p * 1 * 10^{-5}} \quad (9.22)$$

$$\tau_B = \frac{L_B}{R_B} = \frac{21,3 * 10^{-3}}{5} = 4,26 * 10^{-3} s \quad (9.23)$$

$$F_B(p) = \frac{\frac{1}{R_b}}{1 + p\tau_B} = \frac{0,2}{1 + p * 4,26 * 10^{-3}} \quad (9.24)$$

$$K_{CI} = \frac{U_{out}}{I_{IN}} = \frac{5,1}{16,66} = 0,306 \quad (9.25)$$

$$F_s(p) = K_{CI} * F_B(p) * F_M(p) \quad (9.26)$$

$$F_s(p) = 0,306 * \frac{0,2}{1 + p * 4,26 * 10^{-3}} * \frac{2,84}{1 + p * 10^{-5}} \quad (9.27)$$

$$F_s(p) = \frac{0,1738}{(1 + p * 4,26 * 10^{-3}) * (1 + p * 10^{-5})} \quad (9.28)$$

$$F_{OM}(p) = \frac{1}{2 * \tau_\sigma p * (\tau_\sigma p + 1)} \quad (9.29)$$

$$F_{RI}(p) = F_{OM}(p) * \frac{1}{F_s(p)} \quad (9.30)$$

$$F_{RI}(p) = \frac{(1 + p * 4,26 * 10^{-3}) * (1 + p * 10^{-5})}{2 * 10^{-5} * p * (10^{-5} * p + 1) * 0,1738} \quad (9.31)$$

$$F_{RI}(p) = \frac{1}{3,476 * 10^{-6} * p} + \frac{4,26 * 10^{-3}}{3,476 * 10^{-6}} \quad (9.32)$$

$$F_{RI}(p) = \frac{1}{3,476 * 10^{-6} * p} + 1225,5 \quad (9.33)$$

Výpočet hodnot součástek z přenosu regulátoru:

$$F_{RI}(p) = \frac{1}{R_1 * C_1 * p} + \frac{R_2}{R_1} \quad (9.34)$$

$$R_1 * C_1 = 3,476 * 10^{-6} \quad (9.35)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 1225,5 \quad (9.36)$$

Takovýto výpočet se provádí pomocí učení hodnoty jedné součásky, například rezistoru, a následného dopočítání zbylých parametrů. Pokud zvolíme tedy velikost odporu R_1 $4,7\Omega$, vychází hodnoty C_1 a R_2 následovně.

$$C_1 = \frac{3,476 * 10^{-6}}{R_1} = \frac{3,476 * 10^{-6}}{4700} = 739,6pF \quad (9.37)$$

$$R_2 = 1225,5 * R_1 = 1225,5 * 4700 = 5,76M\Omega \quad (9.38)$$

9.1.3 Návrh proudového regulátoru 250W dynama

Tato část obsahuje návrh proudového regulátoru na 250W dynama a výpočet konkrétních parametrů.

Změřené parametry 250W dynama pro výpočet regulátoru:

$$L_b = 16,08mH$$

$$R_b = 4,75\Omega$$

Výpočet přenosů proudového regulátoru:

$$K_M = \frac{U_d}{U_r} = \frac{14,5}{5,1} = 2,84 \quad (9.39)$$

$$\tau_M = \frac{1}{2 * f_m} = \frac{1}{2 * 50 * 10^{-3}} = 1 * 10^{-5}s \quad (9.40)$$

$$F_M(p) = \frac{K_M}{1 + p\tau_M} = \frac{2,84}{1 + p * 1 * 10^{-5}} \quad (9.41)$$

$$\tau_B = \frac{L_B}{R_B} = \frac{16,08 * 10^{-3}}{4,75} = 3,385 * 10^{-3}s \quad (9.42)$$

$$F_B(p) = \frac{\frac{1}{R_b}}{1 + p\tau_B} = \frac{0,211}{1 + p * 3,385 * 10^{-3}} \quad (9.43)$$

$$K_{CI} = \frac{U_{out}}{I_{IN}} = \frac{5,1}{22} = 0,232 \quad (9.44)$$

$$F_s(p) = K_{CI} * F_B(p) * F_M(p) \quad (9.45)$$

$$F_s(p) = 0,306 * \frac{0,211}{1 + p * 3,385 * 10^{-3}} * \frac{2,84}{1 + p * 10^{-5}} \quad (9.46)$$

$$F_s(p) = \frac{0,139}{(1 + p * 3,385 * 10^{-3}) * (1 + p * 10^{-5})} \quad (9.47)$$

$$F_{OM}(p) = \frac{1}{2 * \tau_{\sigma} p * (\tau_{\sigma} p + 1)} \quad (9.48)$$

$$F_{RI}(p) = F_{OM}(p) * \frac{1}{F_s(p)} \quad (9.49)$$

$$F_{RI}(p) = \frac{(1 + p * 3,385 * 10^{-3}) * (1 + p * 10^{-5})}{2 * 10^{-5} * p * (10^{-5} * p + 1) * 0,139} \quad (9.50)$$

$$F_{RI}(p) = \frac{1}{2,78 * 10^{-6} * p} + \frac{3,385 * 10^{-3}}{2,78 * 10^{-6}} \quad (9.51)$$

$$F_{RI}(p) = \frac{1}{2,78 * 10^{-6} * p} + 1217,63 \quad (9.52)$$

Výpočet hodnot součástek z přenosu regulátoru:

$$F_{RI}(p) = \frac{1}{R_1 * C_1 * p} + \frac{R_2}{R_1} \quad (9.53)$$

$$R_1 * C_1 = 3,476 * 10^{-6} \quad (9.54)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 1225,5 \quad (9.55)$$

Takovýto výpočet se provádí pomocí učení hodnoty jedné součásky, například rezistoru, a následného dopočítání zbylých parametrů. Pokud zvolíme tedy velikost odporu R_1 4,7 Ω , vychází hodnoty C_1 a R_2 následovně.

$$C_1 = \frac{2,78 * 10^{-6}}{R_1} = \frac{2,78 * 10^{-6}}{4700} = 591,49 pF \quad (9.56)$$

$$R_2 = 1217,63 * R_1 = 1217,63 * 4700 = 5,723 M\Omega \quad (9.57)$$

9.2 Návrh napěťového regulátoru

Napěťový regulátor byl navrhován experimentálně. Bylo vyzkoušeno mnoho variant P regulátorů i PI regulátorů. Z mnoha variant byla vybrána ta, která fungovala nejlépe. Experimentálně byl vybrán P regulátor s jednotkovým zesílením. Oproti původnímu zapojení musel být odstraněn kondenzátor $C6$ a nahrazen drátovou pojčkou.

10 Princip funkce zapojení

Tato kapitola se zabývá podrobným vysvětlením funkce celého zapojení regulátoru. Celkový popis zapojení je rozdělen na části podle stavu, v jakém se dynamo nachází

nebo podle toho, jaký jev se nejvíce projevuje.

10.0.1 Analýza při zastaveném dynamu

Začneme popisem obvodu při zastaveném dynamu. Dynamo je vlivem relé *REL1* spojeno do derivačního buzení, avšak to nemá žádný bližší význam, neboť regulátoru chybí napájecí napětí. Regulátor není schopen funkce bez napájecího napětí alespoň 6 V.

10.0.2 Rozbíhající se dynamo do výstupního napětí 6 V

Po roztočení dynamu je stále dynamo pomocí relé *REL1* spojeno do derivačního buzení a se zvyšujícími se otáčkami se zvyšuje i výstupní napětí dynamu. Zvýšení napětí dynamu je způsobeno remanentním magnetismem. Napětí se zvyšuje s otáčkami k hodnotě kolem 6 V.

10.0.3 Rozbíhající se dynamo do výstupního napětí 8 V

Při hodnotě kolem 6 V začíná fungovat elektronika, ale relé *REL1* stále spojuje dynamo do derivačního buzení. Znamená to tedy, že se stále při zvyšování otáček zvyšuje i výstupní napětí, a to až po hodnotu napětí kolem 8 V.

10.0.4 Analýza regulátoru při zvyšování napětí mezi 8 V a 14,5 V

Při překročení hodnoty výstupního napětí 8 V dojde k rozpojení relé a celé řízení přebírá elektronický regulátor. V tuto chvíli je na Zenerově diodě *D2* konstantní napětí 5,1 V. Na výstupu regulátoru napětí *OZ2A* je minimální napětí, tedy 0,25 V, což udává referenci proudovému regulátoru *OZ2B* na neinvertující vstup. Předpokládejme pouze malý odběr proudu z dynamu do zátěže. V takovém případě čidlo proudu *OZ1B* nemá na výstupu diferenciálního zesilovače *OZ1B* téměř žádné nebo pouze malé napětí. Za těchto předpokladů je na výstupu proudového regulátoru *OZ2B* maximální napětí 5,1 V. Na vstupu komparátoru *IO1* se objevují dva signály. Na neinvertujícím vstupu komparátoru *IO1* je výstup z generátoru trojúhelníkového signálu *OZ3A*, *OZ3B* a na invertujícím vstupu je výstup z proudového regulátoru *OZ2B*. Signál z proudového regulátoru je větší než amplituda trojúhelníkového signálu, což způsobí trvalé sepnutí tranzistoru *IO1*. To znamená, že tranzistory *T1* a *T2* budou rozepnuté. Vlivem rozepnutých tranzistorů *T1* a *T2* vznikne na gate tranzistoru *T3* napětí a dojde k jeho trvalému otevření. Otevření tranzistoru *T3*

způsobí spojení dynama do derivačního zapojení. To znamená, že se vzrůstajícími otáčkami poroste i výstupní napětí.

10.0.5 Analýza nominálního chodu

Při nominálním chodu je výstupní napětí na konstantní hodnotě 14,5 V za předpokladu, že hodnota proudu procházejícího bočníkem se nepřiblíží maximálnímu (12 A, 16,6 A, 22 A podle výkonu dynama). V tuto chvíli je Zenerově diodě *D2* konstantní napětí 5,1 V. Výstup regulátoru napětí *OZ2A* se mění podle otáček dynama. Se zvyšujícími se otáčkami dynama se zvyšuje také napětí na výstupu napěťového regulátoru *OZ2A*. Změnou napětí na výstupu regulátoru napětí *OZ2A* se změní reference proudového regulátoru *OZ2B* a na jeho výstupu se sníží napětí. Tato změna způsobí pokles napětí výstupu proudového regulátoru pod amplitudu generátoru trojúhelníkového signálu *OZ3A*, *OZ3B*. To způsobí spínání komparátoru a generaci PWM. Šířka pulsu je přímo závislá na výstupním napětí proudového regulátoru *OZ2B*. Generace PWM na komparátoru způsobí spínání tranzistorů *T1* a *T2*, které dále spínají MOS-FET tranzistor, který spíná buzení do derivačního zapojení v šířkách pulsu při frekvenci 50 kHz. Změna šířky pulsu zajišťuje, aby na výstupu dynama bylo vždy napětí 14.5 V.

10.0.6 Analýza při zvyšujícím se proudu bočníkem

Bočník je ve výsledném zapojení připojen na svorky Z a K. Toto zapojení je uvedeno v příloze A.2.

Při zvyšování proudu bočníkem od nízkých hodnot až po hodnotu asi o 1 A nižší, než je maximální proud kotvou, se regulátor chová jako při nominálním chodu. Změna proudu bočníkem vyvolá změnu napětí na vstupech diferenciálního zesilovače *OZ1B*. Výstupní napětí diferenciálního zesilovače *OZ1B* se zvyšuje s velikostí proudu procházejícího bočníkem. Tato hodnota je vstupní hodnotou proudového regulátoru.

Pokud se hodnota proudu přiblíží maximální hodnotě, ovlivní chování proudového regulátoru *OZ2B*. Výstupní napětí proudového regulátoru *OZ2B* se sníží, což způsobí zúžení pulsů PWM a snížení výstupního napětí dynama. Avšak v tomto případě je snížení napětí dynama žádoucí, neboť prioritou je ochrana dynama a všech zařízení v obvodu před tepelnými účinky proudu.

11 Ladění parametrů zapojení

Nastavování parametrů regulátoru bylo řešeno vesměs experimentálně, částečně bylo také podloženo výpočtem potvrzujícím správnost experimentálního nastavení.

Konkrétně šlo o tyto parametry:

- Zesílení napětového čidla,
- Zesílení čidla proudu (diferenciálního zesilovače),
- Zesílení a časové konstanty regulátorů proudu a napětí,
- Velikost odporu bočníku,
- Nastavení maximálního proudu procházejícího tranzistorem komparátoru.

Veškeré doladování parametrů jednotlivých částí obvodu probíhalo experimentálně podle reálných parametrů stroje a samotných požadavků na regulátor.

11.1 Nastavení zesílení napětového čidla

Zesílení napětového čidla je dáno napájecím napětím operačních zesilovačů a výstupním napětím dynama. Porovnávací napětí regulátoru napětí je přesně polovina napájecího napětí operačních zesilovačů. Zesílení je tedy rovno poměru velikosti porovnávacího napětí regulátoru a výstupního napětí dynama.

$$K_{CU} = \frac{U_{2,5}}{U_{out}} = \frac{2,5}{14,5} = 0,172 \quad (11.1)$$

11.2 Nastavení zesílení čidla proudu

V samotném zesílení čidla proudu jsou zahrnuty dvě části. První částí je samotný převodník (bočník) o známém odporu. Tato část způsobí převod výstupního proudu dynama I_N na napětí, které je dále zesilováno druhou částí. Druhá část je diferenciální zesilovač, u kterého je nutné nastavit zesílení pomocí trimrů *TR6* a *TR7*. Tyto trimry musejí být nastaveny na přesnou hodnotu. Podmínkou pro jeho správnou funkci je, že velikost odporů trimrů bude přesně stejná.

11.3 Nastavení zesílení a časových konstant regulátorů

Zesílení regulátoru napětí se nastavuje experimentálně podle samotných reakcí na reálném stroji. Časová konstanta regulátoru napětí nemusela být řešena neboť byl zvolen P regulátor.

Zesílení regulátoru proudu se nastavovalo podle výpočtu, ale ten nebyl dostačující pro reálnou aplikaci. Doladění zesílení regulátoru proudu bylo řešeno opět experimentálně snižováním zesílení podle požadavků samotné soustavy. Časová konstanta regulátoru proudu byla nejprve dopočítána jako velice malá hodnota, což se v praktické aplikaci ukázalo jako nevhodné. Regulátor se dostával do nestabilní oblasti, kdy nefungoval správně, a proto bylo nutné tuto časovou konstantu násobně zvýšit, aby bylo dosaženo požadovaných hodnot.

11.4 Nastavení velikosti odporu bočníku

Velikost odporu bočníku byla volena takovým způsobem, aby následné zesílení diferenciálního zesilovače vycházelo v celých číslech a dobře se nastavovalo. Byl zvolen konstantanový drát který téměř nemění svůj odpor se zvyšující se teplotou, protože má velmi malý teplotní součinitel odporu.

11.5 Nastavení maximálního proudu procházejícího tranzistorem komparátoru

Maximální hodnota proudu procházejícího tranzistorem komparátoru byla zjištěna v datasheetu samotného komparátoru. Maximální proud tranzistorem komparátoru je v podstatě roven proudu procházejícímu rezistorem $R9$. Velikost odporu rezistoru $R9$ byla původně zvolena podle datasheetu asi $200\ \Omega$, proud procházející tranzistorem může dosahovat hodnoty až $72,5\ \text{mA}$. Avšak hodnota proudu, který může tranzistorem procházet je maximálně $50\ \text{mA}$. Bylo tedy nutné zvětšit hodnotu odporu rezistoru $R9$. Hodnota odporu byla zvolena na $1\ \text{k}\Omega$, při kterém prochází proud tranzistorem maximálně $14,5\ \text{mA}$, což už nezpůsobuje přetěžování a zkracování životnosti.

12 Návrh DPS

Návrh DPS je možné vidět v příloze pod označením B.1. Probíhal v programu Autodesk Eagle, kde nejprve bylo vytvořeno zapojení regulátoru a z něj byla vytvořena deska. Program je uživatelsky přívětivý a pomáhá navrhujícímu s propojením jednotlivých součástek zobrazením propojených součástek žlutými čarami. Návrh je stále na uživateli, to znamená, že uživatel musí sám navrhnout cesty na DPS a uvažovat různá propojení na desce, neboť se jednotlivé čáry nemohou křížit jako ve schématu.

Návrh osazovací desky je možné vidět v příloze pod označením B.2. Je to v podstatě zobrazený návrh rozložení jednotlivých součástek na DPS. Tento návrh je vhodné mít před samotnou realizací pro snadnější osazování součástek na reálnou desku. Bez osazovací desky by bylo velmi obtížné samotné zařízení realizovat.

13 Instalace do vozidla



Obr. 13.1: Zařízení instalované do vozidla (zakryté)

Zařízení bylo instalováno do traktoru značky Zetor typu 5718. Regulátor se v tomto traktoru nachází v kabině pod volantem na levé straně. Jelikož se samotné dynamo nachází těsně za přední maskou traktoru, je velmi daleko od regulátoru. Regulátor musí správně fungovat i se započítáním parazitních odporů a indukčností.

V tomto traktoru je buzení dynama spojeno s kladným pólem a záporný pól je spojen s kostrou dynama a traktoru. Regulátor je zapojen tak, že proud procházející bočníkem je měřen na kladném pólu.



Obr. 13.2: Zařízení instalované do vozidla (odkryté)

14 Provozní zkoušky

Provozní zkoušky byly provedeny tak, že zařízení bylo instalováno do reálného stroje a několik hodin provozováno. Zjišťování funkčnosti bylo provedeno pomocí palubního ampérmetru, který indikoval dobíjení akumulátoru (při statických zkouškách ještě multimetrem).

Regulátor byl testován na reálném zařízení asi týden. Testování zahrnovalo

- testování při volnoběžných otáčkách traktoru,
- testování při jízdě po silnici,
- testování jízdou v terénu,
- testování při pohonu přípojného zařízení.



Obr. 14.1: Traktor pro testování regulátoru

14.0.1 Testování při volnoběžných otáčkách traktoru

Cílem tohoto testování bylo zjistit, jestli napětí na výstupu dynama dosáhne nominální hodnoty při volnoběžných otáčkách poháněcího stroje. Traktor při této zkoušce stál na místě. K této zkoušce byl jako diagnostický přístroj použit multimetr, neboť nebylo nutné zobrazení průběhu napětí, ale pouze zjištění jeho velikosti.

V tomto testování bylo zjištěno, že při volnoběžných otáčkách traktoru výstupní napětí dynama nedosáhne dostatečné hodnoty, aby byl akumulátor dobíjen. Zároveň ale nedochází k vybíjení akumulátoru přes dynamo. To znamená, že výstupní napětí za těchto podmínek dosahuje asi 13 V.

14.0.2 Testování při jízdě po silnici

Při jízdě na silnici je hlavním účelem zjištění provozního napětí a proudu při snížených vibracích. Traktor při této zkoušce jel po relativně hladké silnici několik kilometrů. Otáčky motoru se při jízdě mění a s těmi se mění i otáčky dynama. Jako diagnostický přístroj mohl být při jízdě použit pouze palubní ampérmetr.

Bylo zjištěno, že při jízdě palubní ampérmetr ukazoval hodnotu proudu tekoucího

do akumulátoru. Změření napětí na výstupu dynama nebylo možné, ale není možné, aby bylo vyšší než napětí akumulátoru. Při vyrovnání napětí akumulátoru a napětí nastaveného regulátorem ampérmetr ukazoval pouze proud odebíraný palubními přístroji (v případě tohoto konkrétního traktoru pouze světly).

14.0.3 Testování jízdou v terénu

Testování jízdou v terénu mělo ověřit funkčnost regulátoru při zvýšených vibracích a rázových změnách otáček motoru (a dynama). Traktor projížděl obtížným terénem (po polních cestách a lesem s pařezy). Jako diagnostický přístroj mohl být při jízdě použit pouze palubní ampérmetr.

Při jízdě v terénu bylo zjištěno kolísání proudu při prudkých změnách otáček motoru traktoru. Mohlo to být způsobeno špatným nastavením časových konstant nebo i mechanickým rázem, který vždy provázel prudkou změnu otáček. Při zvýšených vibracích se projevíly některé konstrukční nedostatky realizovaného zařízení. Například uchycení bočníku bylo nutné vyřešit pevným přichycením uprostřed bočníku. Dalším příkladem je nevhodnost použití pevných drátů na propojení DPS s vývodou a bočníkem z důvodu jejich mechanického poškození. Při velkém mechanickém rázu může dojít k parazitnímu sepnutí relé (při přejetí pařezu).

14.0.4 Testování při pohonu přípojného zařízení

Toto testování mělo za úkol ověřit funkčnost zařízení při připojení přípojného zařízení s různým elektrickým a hydraulickým odběrem. Traktor při této zkoušce stál zabrzdný na místě. Otáčky motoru traktoru byly při zkoušce konstantní (to je podmínka pro přípojná zařízení). Při této zkoušce bylo možné jako diagnostických přístrojů použít multimetr a palubní ampérmetr.

Při této zkoušce bylo zjištěno, že napětí i proud mírně kolísají s hydraulickým odběrem. Proud samozřejmě kolísá podle připojené zátěže, tedy podle připojeného elektrického zařízení.

15 Závěr

Požadavky na návrh nového regulátoru jsou dány uvedenou analýzou a je nutné se jimi striktně řídit, jinak nemá smysl navrhování nového obvodu. V takovém případě je vhodnější použít již navržené amatérské řešení nebo zakoupit průmyslově vyráběný regulátor.

Zařízení bylo instalováno do traktoru značky Zetor typu 5718, který byl z tovární výroby byl osazován dynamy a regulačními relé. Tato varianta instalace do vozidla byla shledána jako lepší než instalace do automobilu nebo motocyklu, neboť na traktoru je možné provést více druhů provozních zkoušek, tedy nejen zkouška při volnoběžných otáčkách a zkouška jízdou na silnici, ale také zkouška v náročném terénu při zvýšených vibracích a zkouška přípojným zařízením.

V práci jsou popsány provozní zkoušky na reálném zařízení, ze kterých vyplývá, že zařízení je plně funkční při všech provedených zkouškách. Ačkoliv se zde objevuje malá chyba při hydraulickém odběru přípojného zařízení a zvýšených vibracích jízdou v terénu, se dá tvrdit, že zařízení vyhovělo provozním zkouškám v plném rozsahu.

Navržený regulátor byl shledán vhodnou náhradou za původní regulační relé v testovaném traktoru. Existuje však stále prostor pro vylepšení zapojení. Příkladem je například proud bočníkem by bylo vhodnější měřit na kladném pólu pomocí napěťového děliče, který by porovnával napětí proti pevné referenci. Bylo by možné také vynechat konektory $B+$ a $B-$, které jsou v konečné fázi nevyužité a regulátor se stává plně zaměnitelným s původním regulačním relé. Je mnoho možných vylepšení do budoucna pro zlepšení regulace nebo odolnosti. Toto je pouze příklad úprav, které by mohly být provedeny.

Tato práce může být dále rozvíjena pro různá vozidla. Konkrétními příklady jsou třeba kolejová vozidla (lokomotivy) nebo i starší lodě. U starších lokomotiv se běžně používala dynama pro dobíjení akumulátorů provoz přístrojů. Tyto stroje však pracují na napětí 110 V, proto při využití tohoto regulátoru bude nutná drobná úprava zapojení i DPS.

Literatura

- [1] Komutace. *Profi elektrika.cz* [online]. Šlapanice u Brna: elektrika.cz, 1999 [cit. 25. 10. 2017]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/terminolog/eterminologitem.2005-05-22.0782698837>.
- [2] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje: I. Elektrické stroje*. 2. vydání. Praha: STNL, 1982.
- [3] Princip stejnosměrných motorů. *Profi Elektrika.cz* [online]. Šlapanice u Brna: elektrika.cz, 2008 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/princip-stejnosmernych-motoru/view>
- [4] *Dílenská příručka*. Kroměříž: Obchodně technická služba národního podniku PAL-MAGNETON Kroměříž, 1962.
- [5] Náhrada relé za elektronický regulátor. *Technika* [online]. kejva.unas.cz., 2005 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://kejva.unas.cz/tech/rele/rele.htm>
- [6] AEV spol. s r.o. KROMĚŘÍŽ [online]. Kroměříž: AEV, 2015 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.aev.cz/>
- [7] *Elektronický regulátor dynama* [online]. Moravská Třebová: Amapro, 2012 [cit. 2017-12-02]. Dostupné z: http://www.amapro.cz/datove_zdroje/ar/konstrukce_ar_2/ar2_422.php
- [8] Dynamo regulátor proudu a napětí. *Ludens.cl* [online]. Chille: ludens.cl, 2004 [cit. 2017-12-01]. Dostupné z: <https://ludens.cl/Electron/dynareg/dynareg.htm>
- [9] VACULLÍK, V. *Snímače proudu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka

Seznam symbolů, veličin a zkratk

f_{vz}	vzorkovací kmitočet
R_{r}	Rezistor ve schématech
U_{b}	budící napětí – dynamo s cizím buzením
B	baterie
U_{i}	indukované napětí dynama
U	elektrické napětí
ΔU_{k}	úbytek napětí způsobený přechodovým odporem kartáčů
I	výstupní elektrický proud
R	elektrický odpor
ΔU_{r}	úbytek napětí způsobený přesycením železa
I_{k}	proud na krátko (zkratový)
I_{n}	jmenovitý proud
I_{b}	proud procházející buzením dynama
I_{a}	proud procházející kotvou dynama
U_0	napětí dynama naprázdno
R_{bd}	odpor budícího vinutí derivačního dynama
I_{max}	maximální proud
U'	přímková charakteristika dynama s cizím buzením
U_{h}	Hallovo napětí
OZ	operační zesilovač
PWM	pulsně šířková modulace (pulse width modulation)
DPS	Deska plošných spojů
PI	Proporcionálně-integrační
L_{b}	indukčnost budícího vinutí dynama
R_{b}	elektrický odpor budícího vinutí
$F_{\text{M}}(p)$	operátorový přenos měniče
τ_{M}	časová konstanta měniče
K_{M}	zesílení měniče
$F_{\text{B}}(p)$	operátorový přenos budícího vinutí dynama
τ_{B}	časová konstanta budícího vinutí
K_{CI}	zesílení čidla proudu
K_{CU}	zesílení čidla napětí
$F_{\text{s}}(p)$	operátorový přenos regulované soustavy
$F_{\text{RI}}(p)$	operátorový přenos proudového regulátoru
$F_{\text{RU}}(p)$	operátorový přenos napěťového regulátoru
f_{M}	frekvence měniče
U_{d}	maximální napájecí napětí

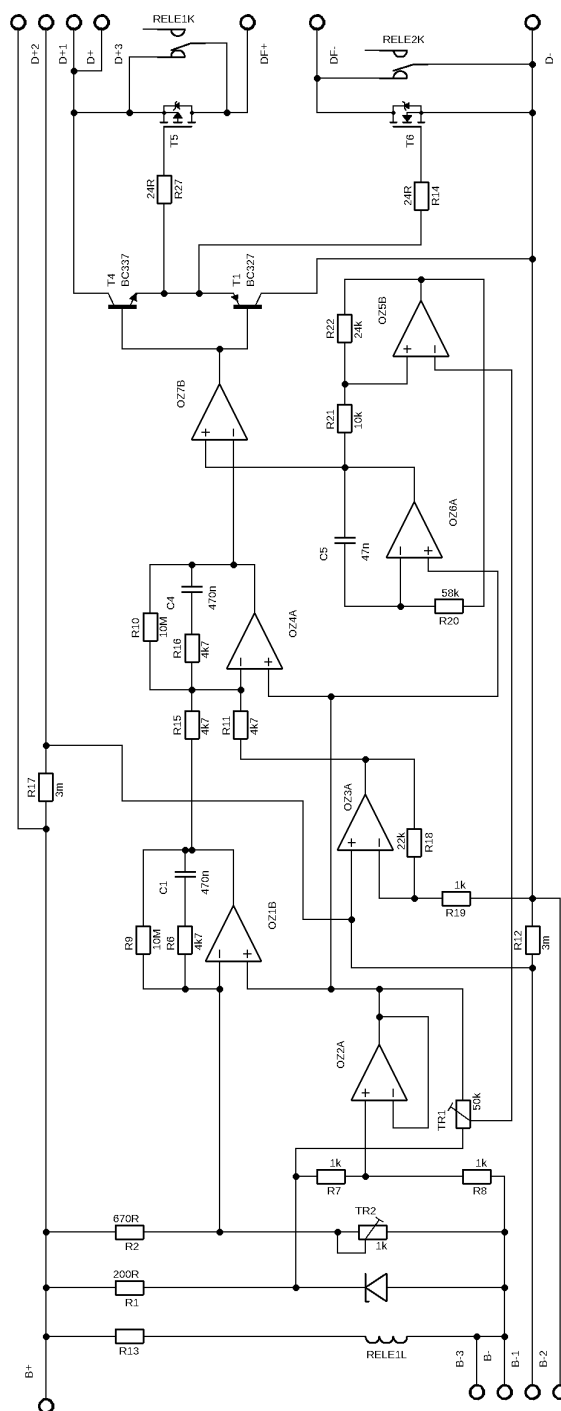
$U_{\text{ř}}$	maximální napětí řídicího obvodu
U_{out}	maximální výstupní napětí čidla proudu
I_{IN}	maximální proud procházející bočником
$F_{\text{OM}}(p)$	operátorový přenos optimálního modulu
R_1	odpor určující zesílení a časovou konstantu PI regulátoru
R_2	odpor určující zesílení PI regulátoru
C_1	kapacita určující časovou konstantu PI regulátoru
$U_{2,5}$	poloviční napětí napájecího napětí OZ
ΔU	zvlnění výstupního napětí
C_{f}	kapacita filtračního kondenzátoru

Seznam příloh

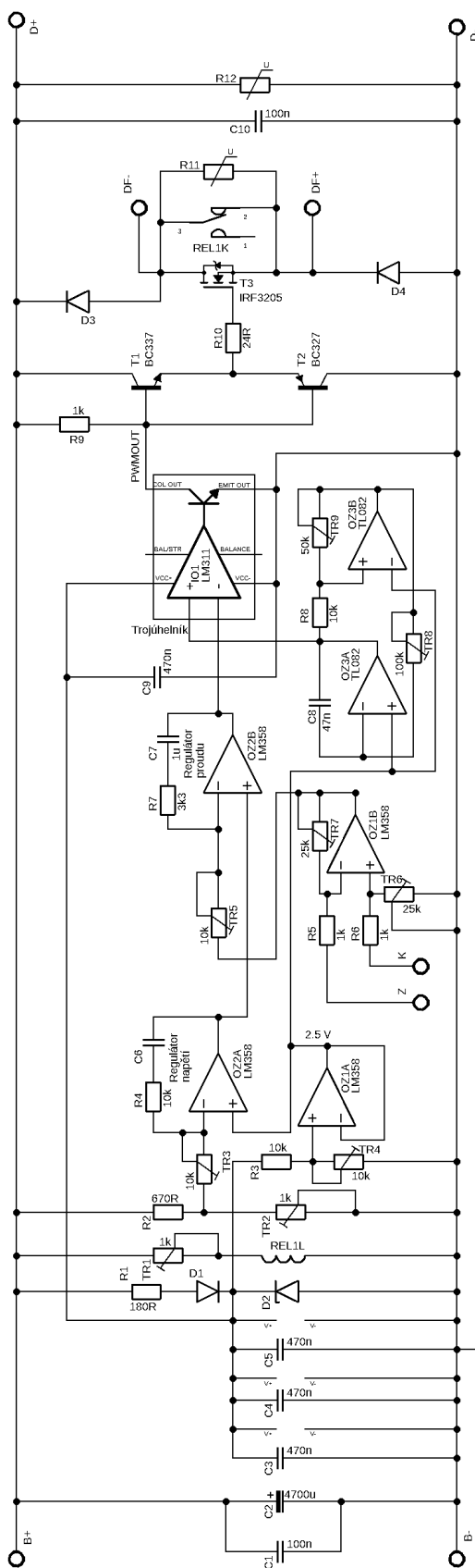
A Schémata	54
A.1 Předběžné schéma	54
A.2 Výsledné zapojení	55
A.3 Seznam součástek	56
B Desky plošných spojů	58
B.1 Návrh desky plošných spojů	58
B.2 Osazovací deska	59

A Schémata

A.1 Předběžné schéma



A.2 Výsledné zapojení



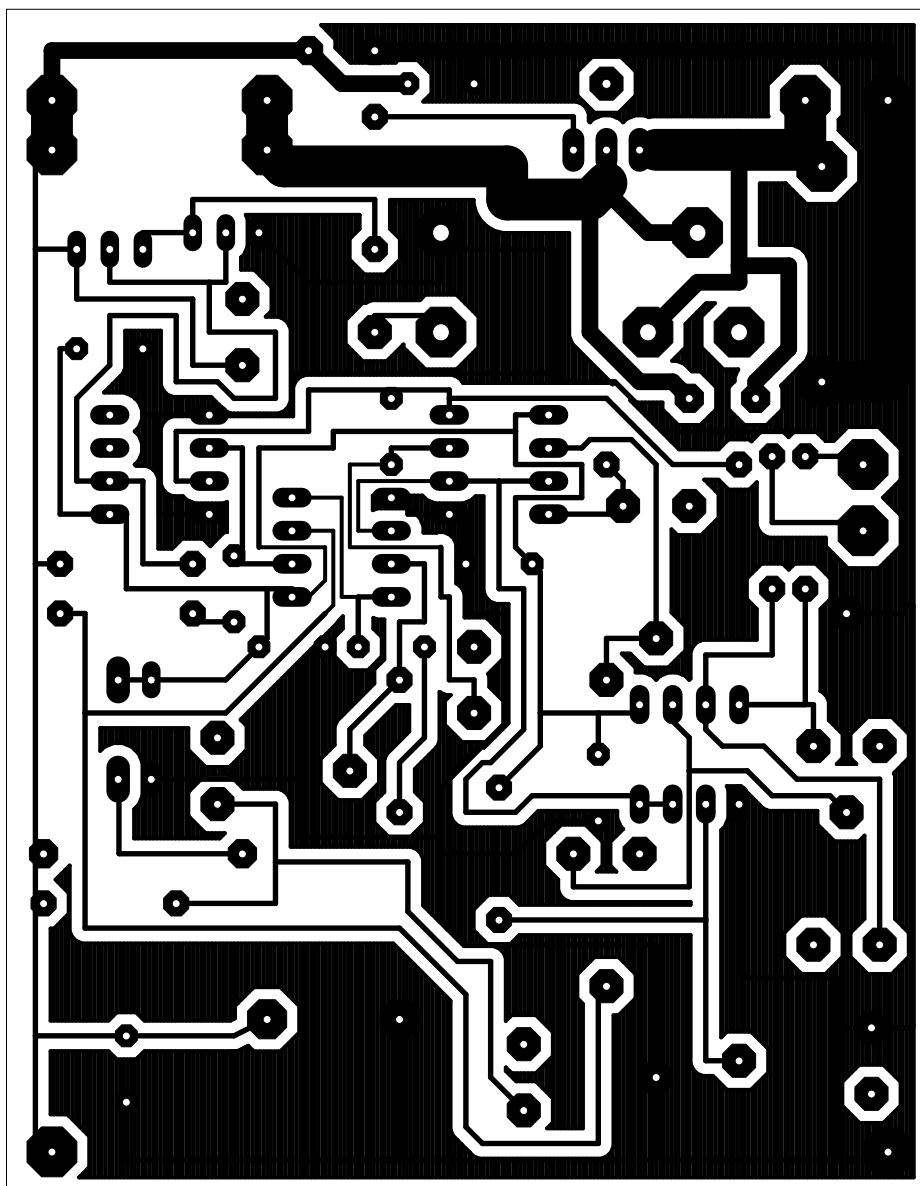
A.3 Seznam součástek

Značka	Součástka	Hodnota/Typ
C1	Kondenzátor keramický	100n
C2	Kondenzátor elektrolyt.	4m7
C3	Kondenzátor keramický	470n
C4	Kondenzátor keramický	470n
C5	Kondenzátor keramický	470n
C6	Kondenzátor keramický	
C7	Kondenzátor keramický	1u
C8	Kondenzátor keramický	47n
C9	Kondenzátor keramický	470n
C10	Kondenzátor keramický	100n
R1	Rezistor	180R/2W
R2	Rezistor	670R
R3	Rezistor	10k
R4	Rezistor	10k
R5	Rezistor	1k
R6	Rezistor	1k
R7	Rezistor	3k3
R8	Rezistor	10k
R9	Rezistor	1k
R10	Rezistor	24R
R11	Varistor	VCR07D220KAR
R12	Varistor	VCR07D220KAR
D1	Dioda	1N4007
D2	Zenerova dioda	BZX85V005.1
D3	Dioda	SB540
D4	Dioda	SB540
OZ1	Operační zesilovač	LM358
OZ2	Operační zesilovač	LM358
OZ3	Operační zesilovač	TL082
IO1	Komparátor	LM311
T1	Bipolární tranzistor	BC337
T2	Bipolární tranzistor	BC327
T3	Unipolární tranzistor	IRF3205
TR1	Trimr	1k
TR2	Trimr	1k

Značka	Součástka	Hodnota/Typ
TR3	Trimr	10k
TR4	Trimr	10k
TR5	Trimr	10k
TR6	Trimr	25k
TR7	Trimr	25k
TR8	Trimr	100k
TR9	Trimr	50k
B+	Připojovací pin	
B-	Připojovací pin	
D+	Připojovací pin	
D-	Připojovací pin	
DF+	Připojovací pin	
DF-	Připojovací pin	
Z	Připojovací pin	
K	Připojovací pin	
	Chladič	V7142

B Desky plošných spojů

B.1 Návrh desky plošných spojů



B.2 Osazovací deska

